©IZA HABURI/GETTY IMAGES/PHOTOMONTAGE SETA

SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

Cerveau Émotions

VAINCRE LE STRESS

p. 28

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 888 - FÉVRIER 2021 - VAINCRE LE STRESS

FÉVRIER 2021 - N° 888 - ALLEMAGNE 7,40 € / AUTRICHE 6,50 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / DOM 5,90 € / DOM-AVION 7,90 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / ANDORRE 5,40 € / PORTUGAL 5,70 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8,60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 888 - F: 5,30 € - RD

Universités, grandes écoles...

DEVENIR INGÉNIEUR.E

Les nouvelles orientations post-Covid p. 50

TIME TO CHANGE*

NOUVEAU 3008
HYBRIDE RECHARGEABLE

Automobiles PEUGEOT 552 144 503 RCS Versailles

À PARTIR DE 29G DE CO_2/KM**

PEUGEOT i-Cockpit® AVEC SYSTÈME DE VISION DE NUIT***

59 KM D'AUTONOMIE EN 100% ÉLECTRIQUE

Achetez sur **store.peugeot.fr**

MOTION & e-MOTION

*Il est temps de changer.

(1) Les valeurs de consommation de carburant, d'émissions de CO_2 et d'autonomie indiquées sont conformes à la procédure d'essai WLTP sur la base de laquelle sont réceptionnés les véhicules neufs depuis le 01/09/2018. Cette procédure WLTP remplace le cycle européen de conduite (NEDC) qui était la procédure d'essai utilisée précédemment. Les conditions d'essai étant plus réalistes, la consommation de carburant et les émissions de CO_2 mesurées selon la procédure WLTP sont, dans de nombreux cas, plus élevées que celles mesurées selon la procédure NEDC. Les valeurs de consommation de carburant, d'émissions de CO_2 et d'autonomie peuvent varier en fonction des conditions réelles

d’utilisation et de différents facteurs, tels que : la fréquence de recharge, le style de conduite, la vitesse, les équipements spécifiques, les options, les types de pneumatiques, la température extérieure et le confort thermique à bord du véhicule. Veillez à vous rapprocher de votre point de vente pour plus de renseignements. Plus d’informations sur peugeot.fr. *** De série, en option ou indisponible selon version.

PEUGEOT RECOMMANDE TOTAL Consommation mixte WLTP (1) (en l/100 km) : de 1,2 à 1,4 ; **Émissions de CO_2 WLTP (en g/km) : de 29 à 32.

VOS AMBITIONS N'ONT PLUS DE LIMITES.

FORZA 750

NOUVEAU FORZA 750. POUR CEUX POUR QUI "TROP" N'EST PAS ASSEZ.

De l'aube au coucher du soleil, vos journées se vivent intensément. Avec un moteur de 58 ch et **4 modes de conduite**, combiné au **contrôle de couple** et à la **transmission à double embrayage**, le Forza 750 est le **scooter GT** idéal dans tous vos déplacements. Vous ne perdrez jamais le contact grâce à l'interface à commande vocale **"Honda Smartphone Voice Control"** couplé à votre smartphone Android™, il facilite la gestion de la navigation, des appels, des messages et de la musique via **l'écran couleur TFT 5"**. Performance, design sportif, confort et agilité, le Forza 750 est l'allié de ceux qui exigent toujours plus, sans compromis.

HONDA

MOTUL

moto.honda.fr

Carole Chatelain
Directrice adjointe de la rédaction

C. CHATELAIN

Un acte éthique et citoyen

Ils ont été tellement attendus, appelés de tous les vœux… Et voilà qu'il a semblé falloir se hâter lentement dans leur déploiement tant le sujet des vaccins est devenu, disons « délicat ». Le gouvernement, reconnaissant avoir été *« sur la défensive »* selon les termes mêmes du ministre de la Santé Olivier Véran, a piloté entre stratégie mesurée et tactique pondérée… avant d'être contraint de donner un violent coup d'accélérateur. Il a en effet été sommé d'écouler — et autrement qu'au compte-gouttes ! — les environ 2,8 millions de doses qui seront livrées d'ici à la fin du mois de février par les laboratoires Pfizer-Biotech et Moderna, sous peine d'être la risée de nos voisins européens. Pourtant, les Français, légitimement impatients de retrouver leur petit café du matin au comptoir et de se divertir au théâtre et cinéma le soir, étaient dans le même temps 58 % à affirmer ne pas vouloir se faire piquer en décembre… contre 50 % en novembre. Les 42 % restants réclamant *a contrario* de pouvoir en bénéficier au plus vite, seuls les personnes âgées de plus de 75 ans puis les soignants de plus de 50 ans ayant été désignés prioritaires. De quoi y perdre son aiguille ! D'autant que le temps presse. Deux nouveaux variants aux caractéristiques inquiétantes ont fait leur apparition, comme l'explique notre journaliste Hugo Jalinière *(p. 74)*, faisant craindre une nouvelle flambée de contagions. Une énième course contre la montre est donc lancée : il s'agit désormais d'aller traquer ces « mutants » dits britannique et sud-africain pour tenter de les prendre de vitesse avant qu'ils ne s'installent durablement sur le territoire… Or, les circonscrire partout où ils sévissent *(p. 74)* nécessite un matériel de séquençage génétique difficilement déployable à grande échelle dans un contexte de pandémie… Une bonne nouvelle cependant : les vaccins existants seraient toujours efficaces contre ces nouveaux mutants. Reste à vacciner le maximum de personnes en un minimum de temps, tout en se hâtant de faire l'injection de rappel… faute de quoi l'efficience décroît. Un tour de force qu'il faut à tout prix réussir pour que les confinements ne s'enchaînent pas en 2021. En attendant, comme l'a d'ailleurs solennellement déclaré le pape François — qui lui-même a perdu un poumon à la suite d'une infection — *« du point de vue éthique, tout le monde doit se faire vacciner »*. Il s'agit d'un acte éthique et citoyen. ■ @carolechatelain

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

Pour joindre la rédaction : 41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris - Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr - Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrices de la rédaction
Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
assistée de Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01 - Carole CHATELAIN (adjointe) - 01.55.35.56.57

Rédacteur(trice)s en chef
Philippe PAJOT (La Recherche) - 01.70.98.19.29
Vincent REA (hors-série) - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Olivier LASCAR (digital) - 01.55.35.56.15

Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10

Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Mathieu NOWAK (actualités - rendez-vous) - 01.55.35.56.38

Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Maryvonne MARCONVILLE - 01.70.98.19.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21

Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18

Cheffe de service
Rachel MULOT (enquêtes) - 01.55.35.56.07

Chef de service adjoint
Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45

Chef(fe)s de rubrique
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvain GUILBAUD (fondamental) - 01.70.98.19.38
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Bérénice ROBERT (environnement) - 01.70.98.19.34

Rédaction
Bernadette ARNAUD grande reporteure (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.44
Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78 -
Arnaud DEVILLARD (numérique, data) - 01.55.35.56.27
Hugo JALINIÈRE (médecine, biologie) - 01.55.35.56.52 -
Sylvie ROUAT (espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Elena SENDER grande reporteure (biologie, neurosciences) - 01.55.35.56.43

Collaborateurs(trices)
Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN, Fabrice NICOT

Chroniqueurs
Aurélien ALVAREZ, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH

Ont participé à ce numéro
Pierre BERLOQUIN, Sylvie BRIET, Pierre KALDY, Sylvie LECHERBONNIER, Anouk TOMAS, Marion de VEVEY

Secrétaire de rédaction
Frank MIETTON (1er secrétaire) - 01.55.35.56.17
Anaëlle BRUYAND (1re secrétaire) - 01.70.98.19.35

Maquette
Horia BAHRI - 01.55.35.56.19

Photo-iconographie
Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41

Pôle digital
Marine BENOIT (fondamental, archéologie) - 01.55.35.56.23
Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70 -
Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24
Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15
Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56
Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Clémence BAUDOIN - responsable projets digitaux
Jessica RIOS - cheffe de projet digital

Documentation Isabelle DO O'GOMES (cheffe de service) - 01.55.35.56.49
Astrid SAINT AUGUSTE - 01.55.35.56.48

Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr

Informatique
Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06

Comptabilité - Ressources humaines
Mélanie BENKHEDIMI - 01.55.35.56.14

Fabrication Christophe PERRUSSON

Publicité MediaObs. 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris
Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com

Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGIE - 01.44.88.93.70

Abonnements et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc
60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros dont un double) : 35 €. 1 an complet (12 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.

Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Directeur de publicité
Sylvain MORTREUIL - 01.44.88.97.75

Directrice de clientèle et responsable Web
Karine GROSSMAN - 01.44.88.89.08

Assistante commerciale
Séverine LECLERC - 01.44.88.97.57

Exécution : Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05

Administration des ventes
Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20

Directeur commercial Valéry SOURIEAU

Partenariat Joëlle HEZARD - 01.58.65.09.99

Directeur des abonnements Luc BONARDI

Responsable des abonnements
Lina QUACH - 01.55.35.56.63

Sciences et Avenir SAS
Président, Directeur de la publication : **Claude PERDRIEL**

Secrétaire général Jean-Claude Rossignol

Multimédia Sciences et Avenir, 41 bis, avenue Bosquet, 75007 Paris.
Tél. : 01 55 35 56 00

PEFC 10-31-3364 PEFC recyclé Ce produit est issu de sources recyclées et contrôlées. pefc-france.org

Origine du papier : Italie

Taux de fibres recyclées : 0 %

Eutrophisation : PTot = 0,017 kg/tonne de papier

Ce magazine est imprimé chez Newsprint (Lieusaint), certifié PEFC

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte un encart « Linvosges » et un message « Challenges » sur une partie de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0620 K 79712. ISSN 00368636. Distribué par Presstalis.

ŠKODA KAMIQ
YOUNG EDITION

À
19 500€(1)

ŠKODA

CAMÉRA DE RECUL

CLIMATISATION

KESSY FULL
(système d'ouverture
et de démarrage sans clé)

LE SUV URBAIN SUREQUIPÉ

LA SÉRIE LIMITÉE YOUNG EDITION VOUS FERA PROFITER DU MEILLEUR DE L'INNOVATION AVEC NOTAMMENT LE SYSTÈME KESSY FULL D'OUVERTURE ET DE DÉMARRAGE SANS CLÉ, LA CAMÉRA DE RECUL* ET LA CLIMATISATION... AVEC TOUTES CES NOUVELLES TECHNOLOGIES, LE ŠKODA KAMIQ VOUS PERMETTRA DE VOIR LA VILLE D'UNE FAÇON INÉDITE. VOUS AVEZ ENFIN TROUVÉ UNE VOITURE AU DESIGN DYNAMIQUE ET AUSSI AUDACIEUSE QUE VOUS.

Modèle présenté : KAMIQ Style 1.0 TSI 95ch BVM avec options au prix de 28 910€.

(1) Prix pour un KAMIQ Young Edition 1.0 TSI 95 ch BVM. Offre à particuliers en France métropolitaine dans le réseau ŠKODA participant, dans la limite des stocks disponibles. Prix conseillés au 01/01/2021. **Young = jeune.**
***Les outils d'aide à la conduite automobile ne dispensent pas le conducteur d'être vigilant.**

Gamme KAMIQ : consommation en cycle mixte (l/100 km) min - max : WLTP : 5,4 - 6,3. Rejets de CO2 (g/km) min - max : WLTP : 100 - 143.
Depuis le 1er septembre 2018, les véhicules légers neufs sont réceptionnés en Europe sur la base de la procédure d'essai harmonisée pour les véhicules légers (WLTP), procédure d'essai permettant de mesurer la consommation de carburant et les émissions de CO2, plus réaliste que la procédure NEDC précédemment utilisée.

Volkswagen Group France - S.A. - Capital : 198 502 510€ - 11, av. De Boursonne - 02600 Villers-Cotterêts - R.C.S. Soissons 832 277 370.

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche
N° 888 - Février 2021

DOSSIER P. 28

Cerveau et émotions
Vaincre le stress

Notre santé physique et mentale est mise à mal par la crise du Covid-19 et ses conséquences sur notre vie quotidienne. *Sciences et Avenir* expose cinq leviers puissants pour faire face au stress, qui nous affecte selon des mécanismes complexes.

5 **Édito** par Carole Chatelain
9 **Courrier**

ÉVÉNEMENT

10 **Les grands rendez-vous de 2021**

SCIENCES FONDAMENTALES

14 **ACTUALITÉS** / Un réseau d'« autoroutes » entre les planètes / Le Royaume-Uni relance la course à la fusion / Une méthode pour construire le robot parfait
38 **La matière cachée enfin débusquée**
42 **Étudier les comportements par l'incarnation virtuelle**
45 **Des fragments d'astéroïde vont être analysés en France**
46 **Les limites de la stylométrie dans l'affaire Grégory**
48 **La Voie lactée comme on ne l'a jamais vue**
49 **La mécanique solaire décryptée**
50 **Spécial formations : devenir ingénieur(e) à l'heure du Covid-19**

NATURE

18 **ACTUALITÉS** / La masse des objets créés par l'humain dépasse la biomasse / Madagascar va devenir un archipel / Découverte d'un serpent inconnu
60 **La ferme s'ouvre (un peu) au bien-être animal**
64 **Le secret des arbres à poison**
67 **Freins et pneus : alerte aux particules fines**
68 **Cinq ans après la COP-21, les défis restent immenses**
69 **Ce mille-pattes vit en enfer**

SANTÉ

22 **ACTUALITÉS** / Un analogue d'une drogue contre la dépression / De la musique antidouleur au bloc opératoire / Vivre plus longtemps et vieillir mieux
70 **Prédire les crises d'épilepsie**
74 **Comment lutter contre les variants du coronavirus**
78 **La double greffe de la dernière chance**
81 **Les émotions dépendraient de la culture**
82 **Dossier spécial : surmonter les maux de l'hiver**
86 **Nutrition : Les légumes racines sans modération**

HISTOIRE

24 **ACTUALITÉS** / Des pointes de flèche en os humain / Les Philistins s'approvisionnaient en Asie du Sud / Un restaurant de « street food » découvert à Pompéi
88 **À Saqqarah, le retour des momies**
92 **Le « duel de dinosaures » sera bientôt visible**
93 **Les femmes aussi chassaient le gros gibier**

RENDEZ-VOUS

94 **La Recherche** Autour d'un livre
96 **Sélection livres**
98 **Expositions**
99 **Le ciel de février**
100 **Questions de lecteurs**
101 **La Recherche** Solution des jeux
102 **La Recherche** Dialogue sur les débris spatiaux
106 **La Recherche** Jeux

Pour les élèves ingénieur(e)s, environnement et numérique sont des secteurs porteurs **p. 50**

La prise en compte du bien-être animal fait une entrée timide chez les éleveurs industriels **p. 60**

Des centaines de momies ont été mises au jour dans la nécropole de Saqqarah ces derniers mois **p. 88**

La Recherche RETROUVEZ NOS CHRONIQUEURS

49 Maths : Aurélien Alvarez
69 Climat : Christophe Cassou et Céline Guivarch
105 Éthique : Jean-Gabriel Ganascia

IZA HABUR/GETTY IMAGES/PHOTOMONTAGE SETA - ANTOINE DEVOUARD/REA - SHUTTERSTOCK - AP/SIPA

GENCI

Chercheurs académiques et industriels, boostez vos recherches par la simulation numérique !

GENCI, Grand Equipement National de Calcul Intensif, vous permet l'accès aux plus puissants supercalculateurs français : 1000 projets de recherche par an dont 400 en IA, ont recours à nos machines de calcul.

Un accès express et privilégié aux supercalculateurs GENCI a été mis au point depuis avril 2020 pour **40 projets engagés dans la lutte contre le Covid-19. Rejoignez-les.**

La TGIR* **GENCI** a pour mission, au niveau national et européen, de favoriser l'usage **gratuit** du calcul intensif associé à l'intelligence artificielle au bénéfice des communautés de recherche ouverte académique et industrielle.

GENCI possède 3 supercalculateurs nationaux hébergés et opérés par les centres de calcul souverains du CEA (TGCC), du CNRS (IDRIS) et des Universités (CINES).

Les moyens de calcul et de stockage de GENCI sont disponibles pour tous les domaines de la recherche et de défis sociétaux (santé/bien-être, numérique, transport, énergie, transition numérique, transition environnementale et énergétique) afin d'aider les chercheurs à booster leurs recherches.

*TGIR – Très Grande infrastructure de Recherche

Protéase majeure (Main protéase Mpro) du SARS-Cov2 simulée par dynamique moléculaire de nouvelle génération avec le logiciel Tinker-HP (https://doi.org/10.26434/chemrxiv.13003166.v1)

© Laboratoire de Chimie Théorique, Sorbonne Université

« Nous utilisons la simulation par dynamique moléculaire afin de modéliser les protéines du virus SARS-Cov-2. Notre objectif : comprendre les faiblesses structurelles du virus à un niveau atomique pour mieux le combattre. Notre challenge : calculer les arrangements possibles des atomes d'une protéine au cours du temps. C'est là qu'interviennent les supercalculateurs qui nous ont permis de modéliser en quelques jours à haute-résolution la protéase principale alors qu'il aurait fallu auparavant plusieurs siècles. » nous explique le Prof. Jean-Philip PIQUEMAL, Directeur du Laboratoire de Chimie Théorique, Sorbonne Université.

© Cyril FRESILLON / IDRIS / CNRS Photothèque

CE PROJET DE LUTTE CONTRE LE COVID-19 A UTILISÉ 40 000 HEURES GPU SUR LE SUPERCALCULATEUR JEAN ZAY (IDRIS).

Laboratoire de Chimie Théorique, Sorbonne Université, UMR CNRS 7616, France.
Laboratoire Jacques Louis Lions, Sorbonne Université, UMR CNRS 7598, France.
Laboratoire GBCMCNAM, Hésam Université, EA 7528, France.
Computational Biomolecular Engineering Laboratory,
Department of Biological Engineering, UT Austin, USA.

GENCI
Le calcul intensif au service de la connaissance

GENCI
6 bis Rue Auguste Vitu
75015 Paris
Tél. : 01 42 50 04 15
www.genci.fr
contact@genci.fr

Publi-communiqué

COURRIER

« Voyage au bout des galaxies »
(Sciences et Avenir-La Recherche n° 886, décembre 2020)

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

En lisant votre article sur cette cartographie inédite du cosmos, j'ai eu, au départ, l'impression qu'il décrivait l'état actuel de notre Univers. Ce qui n'est pas le cas puisque plus l'on s'éloigne, plus la structure étudiée est ancienne « pour nous » mais plus jeune par rapport à la « naissance » de l'Univers. Quand on découvre un quasar à 10 milliards d'années-lumière, on observe ce qu'il était il y a 10 milliards d'années. Mais que sont devenues ces galaxies ?

Jean-Pierre Quiroule

S. et A. : Vos interrogations tournent autour de la notion de simultanéité. Or, du fait de l'existence d'une vitesse limite pour la lumière (300 000 km/s), il n'y a pas de simultanéité dans l'Univers. Son état « actuel » est donc une notion très relative. Lorsque l'on parle d'un quasar à 10 milliards d'années-lumière de nous, on sait qu'on le voit tel qu'il était il y a 10 milliards d'années. Qu'est-il devenu aujourd'hui ? Il est impossible de le savoir puisque c'est seulement en le voyant que nous pourrions être renseignés. Or, rien ne va plus vite que la lumière… Donc, il faudra attendre 10 milliards d'années supplémentaires pour savoir à quoi ressemblait ce quasar alors que nous étions sur Terre en l'an 2021…

À quand un lanceur réutilisable européen ?

Le premier tir de la fusée Ariane 6 est décalé en 2022, et l'on commence seulement à parler de récupérer le premier étage d'un lanceur. Allons-nous rester longtemps les acteurs importants des lancements spatiaux alors que l'américain SpaceX a développé une fusée récupérable assez rapidement et multiplie les projets de capsules ?

Philippe Dozance

S. et A. : L'avance prise par SpaceX est due à son histoire, son fondateur Elon Musk ayant fait d'emblée le pari du réutilisable. Mais cela lui a pris du temps : SpaceX a été fondée en 2002, mais ce n'est que fin 2015 que le premier étage a enfin réussi à se reposer sur sa barge sans encombre. Par comparaison, les premières études pour concevoir Ariane 6 ont été lancées en 2009 et son architecture définie en 2014. Le pas de tir a été mis en chantier en 2015 et la phase de production du lanceur a débuté en 2017. L'Europe a peut-être pris une décennie de retard en matière de réutilisable. Mais la rentabilité de ce système n'est pas encore démontrée pour notre marché.

Les grands rendez-vous de 2021

Recherche fondamentale et haute technologie, biologie et médecine, exploration de l'espace ou de notre passé… la rédaction de *Sciences et Avenir* présente l'agenda des sciences pour l'année qui commence.

Nature

Clap de fin pour la pêche électrique en Europe

Ce type de pêche sera interdit en Europe à compter du 1er juillet. Les Néerlandais devront renoncer aux chaluts faisant passer un courant électrique étourdissant les poissons *(photo)*. **L. C.**

Un ballon de géo-ingénierie dans la stratosphère

Une expérience de géo-ingénierie solaire dénommée SCoPEx devrait débuter en juin avec un ballon stratosphérique lancé au-dessus de la Suède. Elle consistera, à terme, à larguer du carbonate de calcium dans la stratosphère afin d'y réfléchir les rayons du Soleil et provoquer un refroidissement. **F. D.**

Les États-Unis de retour dans l'accord de Paris

Grâce à un « ordre exécutif » de leur nouveau président Joe Biden, les États-Unis réintégreront en février l'accord de Paris sur la lutte contre le changement climatique. Ils communiqueront leurs objectifs pour la COP26 de Glasgow (Écosse) prévue en novembre *(lire aussi p. 68)*. **L. C.**

Un EPR de 2e génération

Le groupe EDF présentera mi-2021 un nouveau modèle de réacteur EPR devant permettre de gagner 30 % sur les délais d'ingénierie et les coûts par rapport à l'unité en construction à Flamanville (Manche), entravée par de multiples retards. **R. M.**

Fondamental

Le LHC va redémarrer

Le plus grand accélérateur de particules situé au Cern, entre la France et la Suisse *(photo)*, devrait reprendre ses activités fin septembre après plus de deux ans de travaux d'améliorations et de préparations de nouvelles expériences. **F. N.**

Des échantillons d'astéroïdes inédits vont être analysés

Une demi-douzaine de laboratoires français recevront des échantillons de l'astéroïde Ryugu rapportés par la sonde japonaise Hayabusa2 *(lire p. 45)*. **F. D.**

Une horloge testera la relativité dans l'espace

Au deuxième trimestre, PHARAO devrait être la première horloge à atomes froids fixée à l'extérieur de la Station spatiale internationale. Précise à 10^{-16} s près, elle servira à tester la théorie de la relativité générale. **F. N.**

Dernière chance pour trouver les WIMPs

Ces particules candidates pour constituer la matière noire seront traquées par les expériences XENONnT en Italie, LUX-Zeplin aux États-Unis et PandaX-4T en Chine. Un échec pourrait remettre en cause leur existence. **F. N.**

Une caméra pour l'énergie noire

Doté de la plus grande caméra au monde (3,2 milliards de pixels), le télescope LSST de l'observatoire Vera Rubin, au Chili, commencera à filmer le ciel en octobre. Objectif : mieux comprendre l'énergie noire qui accélère l'expansion de l'Univers. **P. Ph.**

TON KOENE / DPA /AP / SIPA - 2015-2021 CERN - GEM/ HENEGHANG PENG, ATELIE BRUECKNER - BSIP - NASA

Histoire

Ouverture du Grand Musée égyptien
▸ Le Grand Musée égyptien (GEM) devrait — enfin ! — ouvrir ses portes sur le plateau de Gizeh près du Caire. Avec ses 100 000 objets, il sera le plus grand musée du pays et le nouvel écrin du trésor de Toutankhamon *(photo)*. **B. A.**

On saura si Toumaï était bien bipède
▸ Une étude du fémur de cet hominidé vieux de 7 millions d'années retrouvé au Tchad devrait préciser, en 2021, s'il était bien bipède. Un article paru en 2020 suggère l'inverse. **R. M.**

Ultime exploration de l'épave du « Titanic »
▸ La société américaine Ocean Gate Expeditions prévoit de réaliser cet été une série de 18 plongées en submersible pour aller explorer l'épave du *Titanic*, à 3800 mètres de profondeur. Cette mission sera composée de scientifiques et de citoyens qui participeront à un travail de cartographie 3D de l'épave et documenteront en images son état, qui se dégrade rapidement. Prix du billet : 125 000 dollars. **S. R.**

Un nouveau navire archéologique français
▸ *L'Alfred-Merlin*, le futur navire amiral du Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines (Drassm) sera mis à l'eau au cours de l'année. Ce navire de 46 m en composite, le plus grand du monde, abritera un laboratoire scientifique de haute technologie, et transportera des robots sous-marins (-2500 m) ainsi que des drones. **B. A.**

High-tech

La Nasa et SpaceX testeront leurs lanceurs
▸ Le vol inaugural du lanceur lourd SLS de la Nasa *(photo)* est prévu pour fin 2021. Il est conçu pour envoyer un équipage sur la Lune d'ici à 2024. Un premier vol orbital du vaisseau Starship, censé pouvoir atteindre Mars, est également annoncé par SpaceX. **S. R.**

Premier vol suborbital touristique pour Virgin
▸ Virgin Galactic devrait effectuer un premier vol suborbital touristique, avec à bord du vaisseau VSS Unity son fondateur, le milliardaire Richard Branson. **S. R.**

La reconnaissance faciale dans les services publics en France
▸ L'application mobile Alicem de vérification d'identité par reconnaissance faciale devrait entrer en service cet été. **A. D.**

Le Campus Cyber à la Défense
▸ Le Campus Cyber s'installera à la Défense, près de Paris. Cette entité détenue à 49 % par l'État et à 51 % par le privé rassemblera un millier d'experts en cybersécurité. **A. D.**

Santé

Un 4e plan pour le cancer
▸ Le 4e plan cancer sera établi pour dix ans contre quatre pour les précédents. Conçu après consultation citoyenne, il visera à préserver la survie et la qualité de vie des patients, et à investir dans la prévention et la recherche. **H. J.**

La France se vaccine contre le coronavirus
▸ Environ 14 millions de personnes parmi les plus fragiles face au Covid-19 doivent bénéficier d'une vaccination d'ici à la fin du mois de mars. La campagne devrait ensuite s'élargir à l'ensemble de la population générale. **H. J.**

Le pancréas artificiel arrive…
▸ Le système automatique de délivrance d'insuline français Diabeloop devrait obtenir son remboursement par l'Assurance maladie. Il pourrait concerner 7000 personnes. **S. R.-M.**

… avec le cœur artificiel Carmat
▸ C'est au deuxième trimestre que sera commercialisé le cœur artificiel Carmat. **M. N.**

Lancement d'une étude française sur le cannabis thérapeutique
▸ La première expérimentation en France de cannabis médical portera sur 3000 patients. **H. R.**

L'année 2021 dans l'espace

L'arrivée sur Mars du rover américain Perseverance et le lancement du successeur du télescope Hubble seront les deux événements phares d'une année spatiale très riche.

Par Sylvie Rouat @srouat1

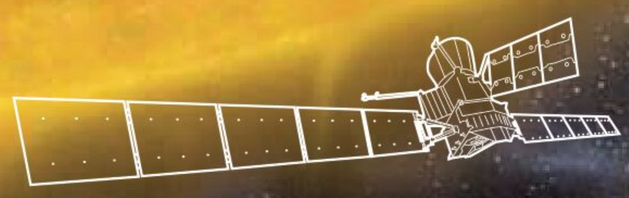
MEHDI BENYEZZAR POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

Soleil

Solar Orbiter au plus près du Soleil

En novembre, la sonde européenne Solar Orbiter atteindra sa destination, à 42 millions de kilomètres du Soleil. Ses dix instruments commenceront alors leurs opérations scientifiques et devraient notamment prendre des clichés des régions polaires de notre étoile.

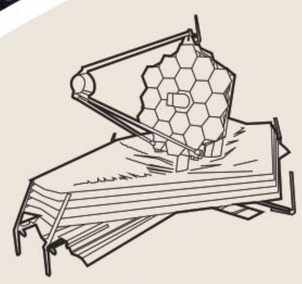
Mercure



Vénus sous l'œil de BepiColombo

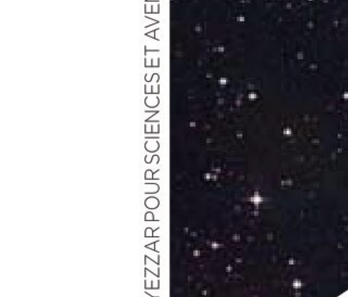
Le 2 octobre 2021, BepiColombo effectuera son premier survol de la planète la plus proche du Soleil, avant de rejoindre son orbite définitive vers 2025. Auparavant, en août, la sonde européenne aura survolé Vénus, où elle croisera Solar Orbiter.

Terre-Lune



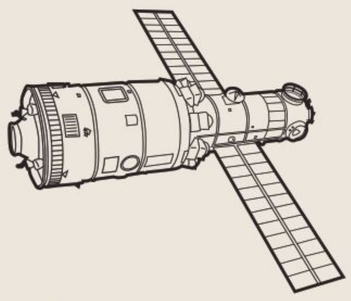
James Webb, le télescope le plus puissant

Le successeur de Hubble, le télescope spatial américano-européen James Webb, sera lancé le 31 octobre à 1,5 million de kilomètres de la Terre, dans la direction opposée au Soleil. Il sera « le télescope le plus puissant et le plus complexe » jamais mis en orbite.



Thomas Pesquet et Tom Cruise dans l'ISS

Ce printemps, l'astronaute français Thomas Pesquet rejoindra la Station spatiale internationale pour une seconde mission de six mois. En octobre, l'ISS accueillera l'acteur Tom Cruise accompagné du réalisateur Doug Liman pour tourner des scènes en apesanteur !

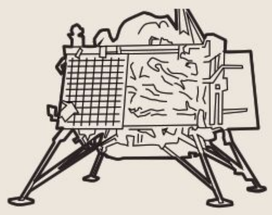


Les débuts de la station spatiale chinoise

L'assemblage de la station spatiale chinoise Tiangong débutera en février, avec la mise en orbite du module central Tianhe, qui sera suivi par le laboratoire spatial Wengtian. Deux équipages devraient y séjourner dès cette année.

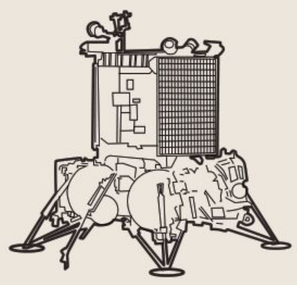
Lune : une nouvelle sonde indienne…

En mars, l'Inde tentera de prendre sa revanche, après l'échec de sa sonde lunaire Chandrayaan-2 en 2019. Sa jumelle, Chandrayaan-3 doit poser un atterrisseur et un astromobile à la surface de notre satellite.



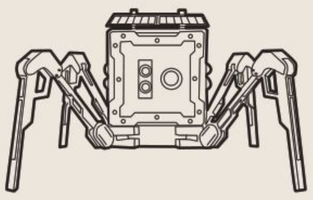
… le retour des Russes…

Luna 25 (Luna-Glob) devrait être le premier engin russe à rejoindre la Lune depuis 1976. Cette mission attendue initialement en 2009 doit être lancée en octobre. Elle est composée d'un orbiteur et de trois pénétrateurs de 250 kg.



… et l'arrivée de plusieurs atterrisseurs

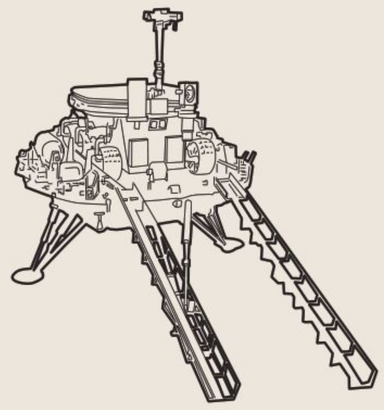
Dans le cadre du programme de retour à la Lune de la Nasa, plusieurs atterrisseurs privés doivent mener des expériences à sa surface. Parmi eux, l'atterrisseur Peregrine de l'américain Astrobiotic prévu pour juin, ou juillet, le britannique Spacebit et son rover *(ci-contre)*.



Mars

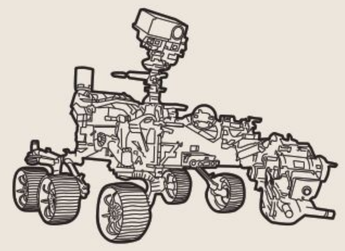
Mission émiratie

C'est le 9 février que la mission Al-Amal des Émirat arabes unis doit se placer en orbite autour de Mars pour en étudier l'atmosphère.
et événement lancera les commémorations du 50e anniversaire de la création de la fédération des Émirats arabes unis.



Rover chinois

Le 11 février, Tianwen-1, première mission interplanétaire chinoise, s'insérera en orbite martienne. En avril, elle larguera un atterrisseur et un astromobile de 240 kg vers la région d'Utopia Planitia, que ce dernier arpentera pendant au moins 3 mois.



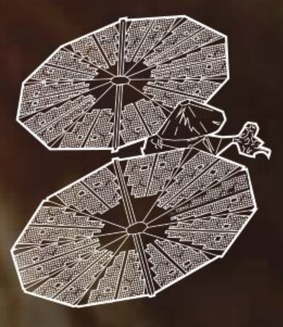
Retour d'échantillons, acte I

L'astromobile Perseverance de la mission américaine Mars 2020 doit se poser le 18 février dans le cratère Jezero, emplacement d'un ancien lac. Il y prélèvera des échantillons en vue de leur retour sur Terre en 2030.
Le petit hélicoptère Ingenuity sera testé à cette occasion.

Jupiter

Nouvelle mission pour Juno

La mission principale de la sonde jovienne Juno s'achèvera en juillet 2021. Mais son extension jusqu'en 2025, annoncée par la Nasa le 13 janvier, lui permettra de survoler les tempêtes boréales de Jupiter, ses satellites Ganymède, Europe et Io, ainsi que d'explorer ses anneaux..



Lucy en orbite

En octobre, sera lancée la sonde Lucy de la Nasa à destination de six astéroïdes « troyens » qui circulent sur l'orbite de Jupiter. Ces corps seraient des fossiles du système solaire primitif, composés des matériaux originels qui ont ensuite formé les planètes.

Astéroïdes

Dévier un astéroïde

Le 22 juillet sera lancée la mission Dart de la Nasa pour aller percuter, en 2022 et à 11 millions de kilomètres de la Terre, la lune de l'astéroïde Didymos afin de la dévier. Une méthode envisagée pour protéger la Terre d'un éventuel astéroïde « tueur ».

Des voies rapides interplanétaires (vue d'artiste) pourraient voir le jour grâce aux courants de gravité qui parcourent l'espace.

Un réseau d'« autoroutes » entre les planètes

Les astéroïdes ou les comètes qui les empruntent s'y déplacent plus rapidement, sur des décennies au lieu de centaines de milliers d'années.

NASA

ASTRONOMIE Des « courants de gravité », comparables aux courants marins sur notre planète, jalonnent l'espace. Une équipe serbo-américaine de l'Observatoire astronomique de Belgrade (Serbie) a mis en évidence une structure monumentale jamais encore détectée dans notre système solaire : des courants reliés les uns aux autres en une série d'arcs s'étendant de la ceinture principale d'astéroïdes (située entre Mars et Jupiter) à Uranus et au-delà. Lorsqu'ils viennent à emprunter l'une de ces voies, les objets célestes comme les astéroïdes ou les comètes s'y déplacent plus rapidement, en quelques décennies au lieu de centaines de milliers, voire de millions d'années, qui caractérisent habituellement la dynamique du système solaire.

Les astronomes estiment que ces voies rapides pourraient permettre à des engins spatiaux de parcourir 100 unités astronomiques (UA) en moins d'un siècle (une UA correspond approximativement à la distance entre la Terre et le Soleil, soit environ 150 millions de kilomètres). **M. B.**

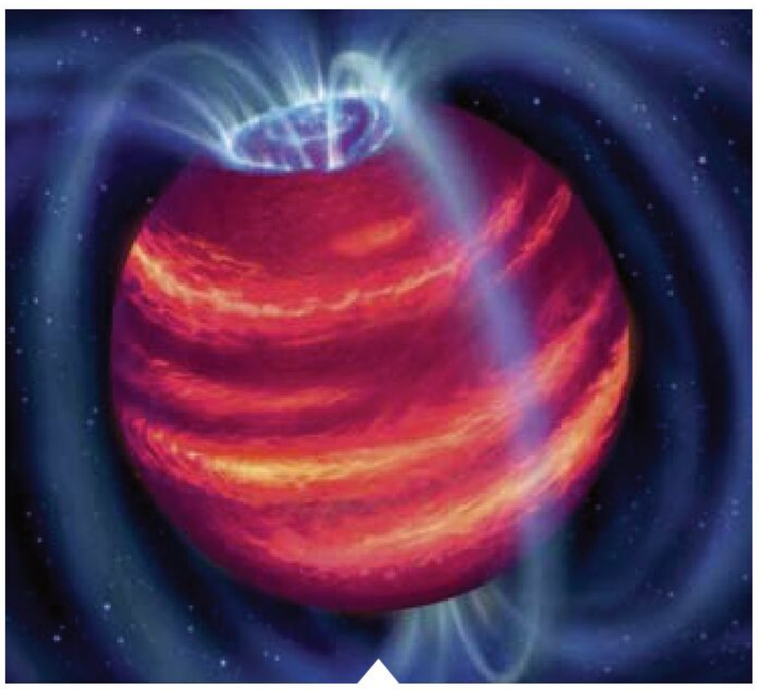
EN DEUX MOTS

LUNE. Après l'échec de la mission Bereshit, qui s'est écrasée sur la Lune en avril 2019, Israël tentera à nouveau l'opération en 2024 avec cette fois un orbiteur et deux atterrisseurs. **HORIZONS.** Après avoir survolé Pluton en 2015 et l'astéroïde Arrokoth en 2019, la sonde américaine New Horizons se cherche une nouvelle cible dans la ceinture de Kuiper. **ARECIBO.** Porto Rico a annoncé l'allocation de 8 millions de dollars pour envisager la reconstruction du radiotélescope géant d'Arecibo qui s'est effondré le 1er décembre.

Première détection d'une naine brune par émission radio

ASTRONOMIE Pour la première fois, l'émission radio d'une étoile de type naine brune a été enregistrée par le radiotélescope européen Lofar. Une telle observation prouve qu'il sera bientôt possible de détecter autrement que par vision directe des étoiles très froides, et donc difficilement observables dans le visible. **M. B.**

SOURCE : H.K. VEDANTHAM, UNIVERSITÉ DE GRONINGUE, PAYS-BAS.

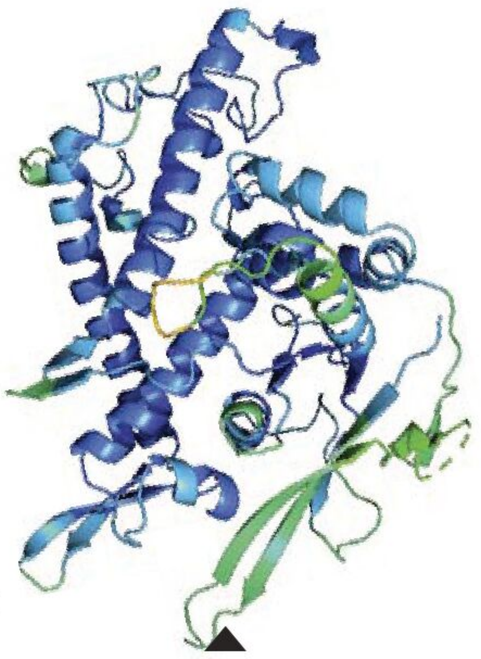


DANIELLE FUTSELLAR/ASTRON

BDR J1750+3809, une naine brune, a été repérée par le radiotélescope européen Lofar (vue d'artiste).

Une IA replie les protéines

CHIMIE Grâce à AlphaFold, un programme d'intelligence artificielle conçu par la société Deepmind, il serait enfin possible de prédire presque totalement la structure tridimensionnelle d'une protéine (à 92 % précisent les auteurs contre 50 % auparavant). Le fonctionnement de ces molécules dépendant étroitement de leur forme, parvenir à mieux prédire celle-ci permettra de concevoir des médicaments plus efficaces. **H. R.**



La structure 3D de cette protéine a été déterminée par AlphaFold.

DEEPMIND

Si le décollage (à gauche) s'est passé sans problème, après une descente trop rapide, le vol a fini en un crash monumental.

AFP-REUTERS

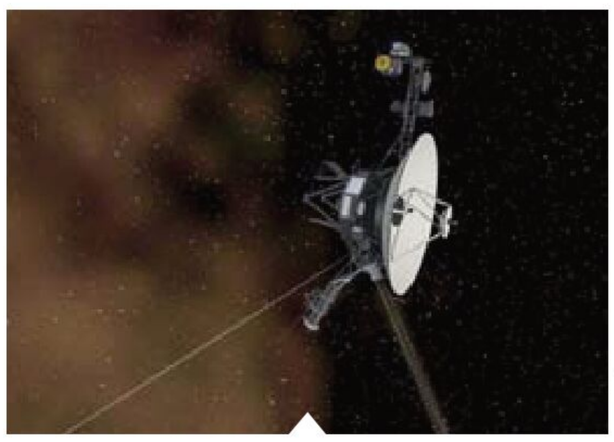
Starship, vol réussi et atterrissage raté

ESPACE Le 9 décembre 2020, le 8e prototype du Starship de SpaceX a effectué un premier vol à haute altitude, atteignant 12,5 km. Le lanceur, destiné aux vols vers Mars, a en outre réussi pour la première fois une manœuvre de retournement pour revenir se poser sur la base de Boca Chica (États-Unis). Mais, sa descente trop rapide a provoqué son explosion au moment de toucher le sol, après 6 min 40 s de vol. **S. R.**

Les sondes Voyager témoignent encore des colères du Soleil

Toujours actifs 40 ans après leur lancement, les deux engins américains contribuent à une meilleure compréhension du milieu interstellaire.

ASTROPHYSIQUE Très éloignées du Soleil, Voyager 1 et 2 (à respectivement 22,62 et 18,79 milliards de kilomètres) peuvent encore témoigner de ses colères. Elles viennent en effet de détecter des rafales d'électrons dont les plus véloces se déplacent à des vitesses relativistes. « *Un mécanisme jamais observé jusque-là* », souligne Donald Gurnett, de l'université de l'Iowa (États-Unis). Quand le Soleil entre en éruption, il génère des ondes de choc qui se propagent vers l'extérieur du système solaire. Ces ondes réfléchissent et propulsent les électrons de haute énergie circulant le long des lignes du champ magnétique interstellaire. Un processus similaire accélère des électrons d'énergie beaucoup plus faible qui, eux, entraînent des oscillations du plasma interstellaire. Leur détection va permettre de mieux déterminer la composition de ce milieu interstellaire où les deux sondes sont les premières à s'aventurer. **J. I.**



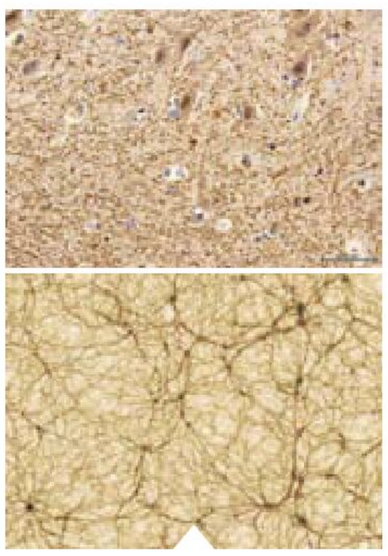
NASA/JPL-CALTECH

La sonde Voyager 1 se trouve aujourd'hui à 22,62 milliards de kilomètres du Soleil.

L'organisation du cerveau ressemble à celle de l'Univers

COSMOLOGIE 27 ordres de grandeur séparent les réseaux de neurones du cerveau des filaments cosmiques reliant les galaxies. Pourtant ces structures sont caractérisées par des niveaux proches d'organisation et de complexité. La connectivité au sein de ces deux réseaux pourrait donc évoluer selon des principes physiques similaires. **J. I.**

SOURCE : F. VAZZA, UNIVERSITÉ DE BOLOGNE, ITALIE.



© F. VAZZA ET AL., DR E. ZUNARELLI

Réseau de neurones (en haut) et filaments cosmiques reliant les galaxies dans l'Univers.

XXXXXX

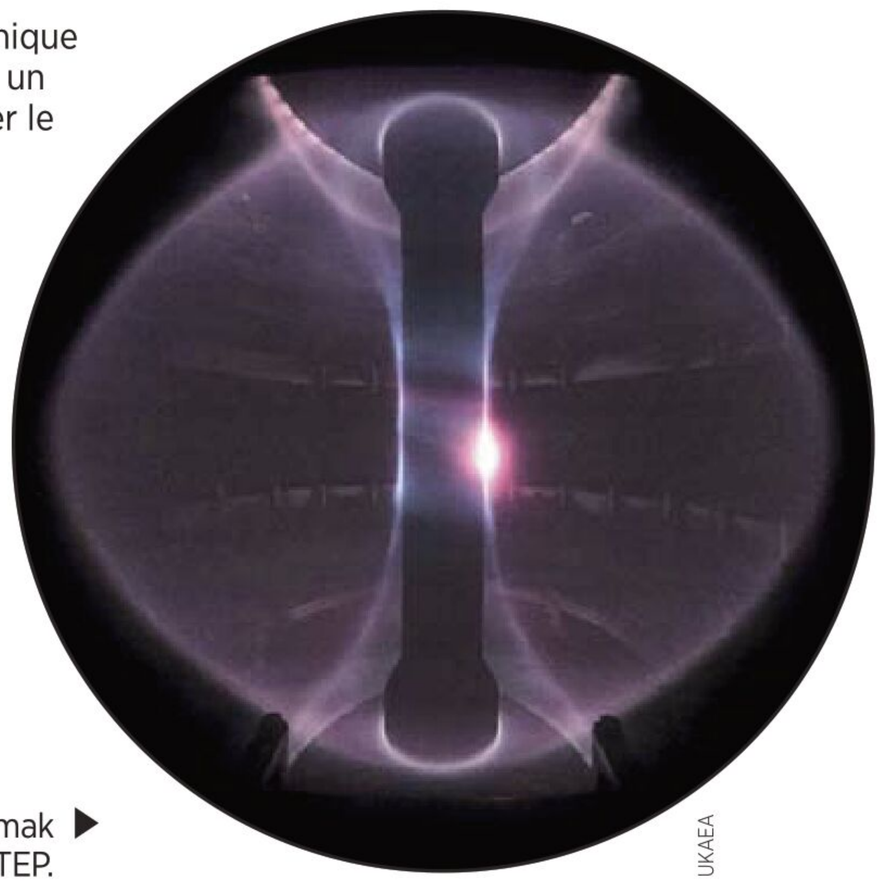
La capsule contenant les matériaux a atterri le 17 décembre 2020.

1,731 kg La masse de matériaux lunaires rapportés par une mission chinoise

ESPACE Ce sont les premiers échantillons lunaires depuis les programmes américains (Apollo) et soviétiques (Luna) entre 1969 et 1976 qui avaient respectivement permis d'en rapporter 382 kg et 326 g. La mission chinoise Chang'e5, entièrement automatisée, aura duré à peine plus de trois semaines. Les matériaux ont été recueillis en surface mais aussi jusqu'à un mètre de profondeur. **F. D.**

Le Royaume-Uni relance la course à la fusion

NUCLÉAIRE L'Autorité britannique de l'énergie atomique a lancé un appel d'offres pour déterminer le site de son futur réacteur à fusion. Un projet dénommé STEP (Spherical Tokamak for Energy Production) à 2 milliards de livres sterling pour produire 100 mégawatts d'énergie à l'horizon 2040. Certes c'est cinq fois moins que le projet international ITER, installé en France, mais STEP devrait, lui, être raccordé au réseau électrique. **F. D.**



UKAEA

Plasma à l'intérieur du tokamak MAST, prédécesseur du futur STEP. ▶

100 millisecondes

Le retard minime qu'aurait pris une horloge « quantique » depuis le Big Bang

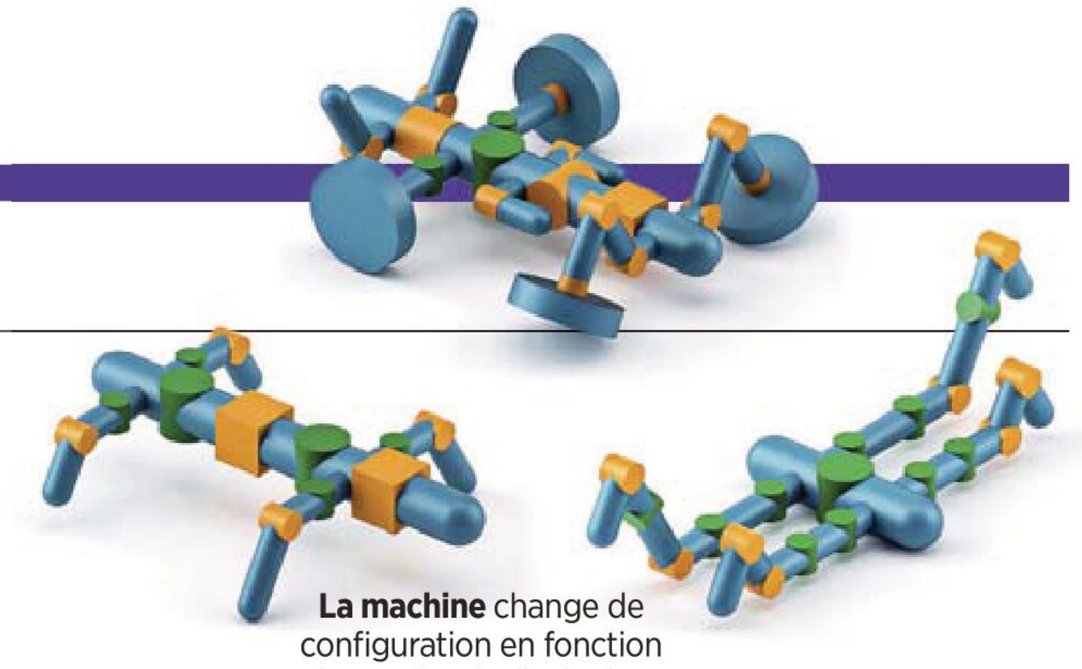
PHYSIQUE Un nouveau type d'horloge atomique mis au point au MIT (États-Unis) bat des records de précision. Utilisant le phénomène de l'intrication quantique, il repose sur la mesure de l'oscillation d'atomes de césium ultrafroids. **F. N.**

AIRBORNE SYSTEMS

Parachute conçu par Airbone Systems pour un rover martien de la Nasa.

ExoMars toujours pas prête pour le grand saut

ESPACE Prévue en 2020, reportée à 2022 en raison de difficultés techniques, la mission russo-européenne ExoMars est toujours à la peine : lors des derniers tests, ses parachutes se sont à nouveau déchirés en de multiples endroits. À cours de solutions, l'Agence spatiale européenne a appelé à la rescousse Airborne Systems, un équipementier américain qui fabrique des parachutes pour la Nasa. **F. D.**



MIT

La machine change de configuration en fonction du terrain où elle évolue.

Une méthode pour construire le robot parfait

ALGORITHMIQUE Générer des robots adaptés au terrain sur lequel ils vont évoluer à partir des pièces dont on dispose : voilà ce que promet le programme informatique RoboGrammar. La machine peut avoir des pattes, des roues ou les deux et embarque un algorithme pour définir son comportement. Ces robots sont testés virtuellement sur un terrain modélisé. **A. D.**

SOURCE : ALLAN ZHAO, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, CAMBRIDGE, ÉTATS-UNIS.

Avec les androïdes, tout est dans le regard

ROBOTIQUE Lorsqu'un robot regarde un humain dans les yeux, la réponse émotionnelle de ce dernier (expression du visage, rythme cardiaque…) se révèle équivalente à celle observée lors d'un face-à-face entre humains. Conclusion : un contact visuel entraîne une anthropomorphisation de la machine. **A. D.**

SOURCE : HELENA KIILAVUORI, UNIVERSITÉ DE TAMPERE, FINLANDE.

HELENA KIILAVUORI ET AL.

Fixer un robot ou un humain provoque les mêmes émotions.

QUESTIONS À

Saïda Guellati-Khélifa

Physicienne au Conservatoire national des arts et métiers (Cnam), Paris

Record de précision pour la constante de structure fine

Cette constante de la physique a été mesurée avec 11 chiffres significatifs par une équipe du laboratoire Kastler Brossel du CNRS et du Cnam, améliorant d'un facteur 1000 la dernière mesure en date.

Que représente la constante de structure fine en physique ?
Elle est associée à tous les phénomènes électriques et magnétiques, notamment la cohésion des atomes. Elle constitue aussi une passerelle entre matière et lumière, en décrivant l'interaction entre le champ électromagnétique des photons (la lumière) et les particules chargées.

En quoi est-il important de la connaître avec précision ?
Elle permet de tester le modèle standard de la physique des particules, et éventuellement de pointer la possibilité d'une nouvelle physique au-delà de ce modèle. Par exemple grâce à « l'anomalie du moment magnétique de l'électron ». Ce moment peut se mesurer, ou se calculer théoriquement avec la constante de structure fine. Un écart entre les deux valeurs pourrait être le signe de l'existence d'une nouvelle particule.

Quel est le principe de la mesure ?
La constante se déduit de la masse de l'électron, laquelle n'est pas mesurable directement. On ne connaît que le rapport de masse entre l'électron et celle d'un atome. Nous avons travaillé sur l'atome de rubidium-87, en déterminant sa masse à partir de sa vitesse de recul lorsqu'il absorbe un photon. Pour une mesure précise, l'astuce consiste à lui envoyer 1000 photons. C'est un peu comme mesurer l'épaisseur d'une feuille de papier avec une règle : le résultat est imprécis. Mais en mesurant celle de 1000 feuilles, et en la divisant par 1000, il est meilleur.

Propos recueillis par F. N.

HUBERT RAGUET/LKB/CNRS PHOTOTHÈQUE

CITROËN

C4

100% ELECTRIC

NOUVELLE CITROËN Ë-C4 100% ËLECTRIC

OUVREZ LA ROUTE

CITROËN ADVANCED COMFORT

19 aides à la conduite*
Affichage Tête Haute Couleur
Écran tactile 10'' avec Mirror Screen
Support de tablette passager amovible*
Suspensions avec Butées Hydrauliques Progressives®

INSPIRED BY YOU ALL

ÉGALEMENT DISPONIBLE EN VERSION ESSENCE OU DIESEL

100% electric : 100 % électrique. Mirror Screen : écran miroir. *Équipement de série, en option ou non disponible selon les versions.

AUTOMOBILES CITROËN : RCS PARIS 642 050 199

Victoire citoyenne pour l'eau du robinet

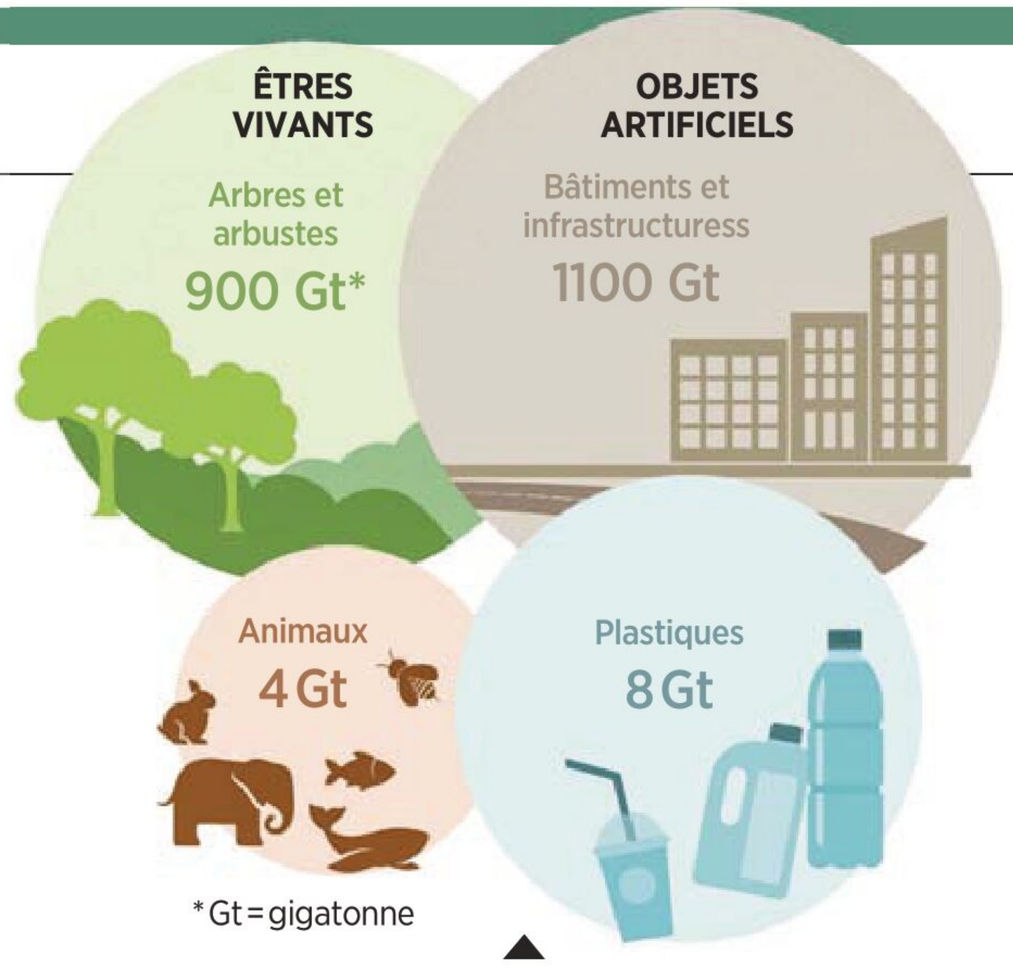
RESSOURCES La pétition citoyenne Right2Water, la première du genre (un million de signatures avec une pondération par pays), a abouti à une révision des normes sur l'eau potable. Désormais, les microplastiques, les perturbateurs endocriniens et les résidus pharmaceutiques vont s'ajouter aux normes existantes comme les teneurs en nitrates ou en pesticides. Les États s'engagent aussi à promouvoir l'eau du robinet pour faire baisser la vente de bouteilles en plastique. **L. C.**

BSIP

L'eau devra satisfaire à des normes plus sévères.

La masse des objets créés par l'humain dépasse la biomasse

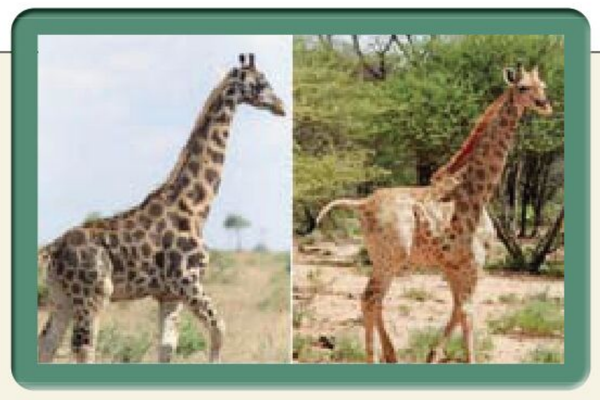
D'ici à 2040, la masse des objets artificiels devrait même être trois fois supérieure.



Alors que la biomasse (êtres vivants), provenant à 90 % des arbres, est stable, celle due aux objets artificiels, principalement les constructions, double tous les 20 ans.

BRUNO BOUGEOIS

ANTHROPOCÈNE Les objets fabriqués par les humains sont en train de l'emporter sur la masse totale de tous les êtres vivants (la biomasse). D'ici à 2040, la masse des objets artificiels devrait même être trois fois supérieure selon une étude parue dans la revue *Nature*. Les chercheurs de l'Institut Weizmann à Rehovot (Israël) expliquent qu'en 1900, la masse des objets fabriqués par l'humain ne représentait que 3 % de la biomasse. Mais alors que la masse des êtres vivants sur Terre est restée à peu près la même depuis (dont 90 % sont à mettre au compte des arbres et arbustes), les objets fabriqués par les humains ont, eux, doublé environ tous les vingt ans. La plus grande production d'objets artificiels a eu lieu après la Seconde Guerre mondiale, au cours d'une période de consommation accrue et de développement urbain. La majeure partie de la masse artificielle se trouve désormais dans les infrastructures telles que les bâtiments et les routes. Il est impossible de dire précisément quand la masse artificielle a dépassé ou dépassera la biomasse, mais l'équipe estime que cela a eu ou aura lieu entre 2014 et 2026. **C. L.**



GIRAFFE CONSERVATION FOUNDATION

À VOIR SUR LE NET

Des girafes naines ont réussi à survivre en Afrique

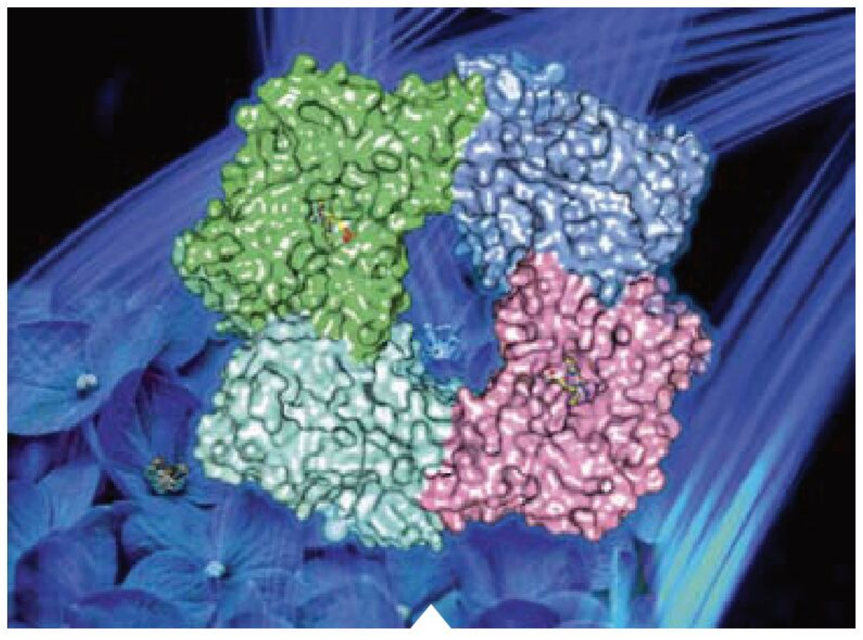
ZOOLOGIE Une première dans la littérature scientifique : Michael Butler Brown et Emma Wells, de la Fondation pour la conservation des girafes à Windhoek (Namibie), ont décrit deux girafes naines. Elles souffrent de nanisme disproportionné, c'est-à-dire de membres plus petits que la normale sur certaines parties du corps. Malgré leur handicap, les deux animaux ont réussi à passer la phase critique de l'enfance. **A.-S. T.**

sciav.fr/888girafes

Sans yeux, les plantes perçoivent le bleu

BOTANIQUE Les plantes « voient » les couleurs. Une équipe américaine vient de le prouver en démontrant que des molécules très présentes dans leurs cellules réagissent à une lumière bleue : la structure unique de ces cryptochromes se divise en quatre unités liées entre elles. Ce processus suggère que la lumière produit des régulateurs qui influent sur l'expression de certains gènes selon des mécanismes encore à découvrir. **L. C.**

SOURCE : MALATHY PALAYAM, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À DAVIS, ÉTATS-UNIS.



SHABEK LAB

Le cryptochrome se recombine en quatre sous-éléments reliés lorsque la plante est exposée à une lumière bleue.

Propos chocs au sommet One Planet

BIODIVERSITÉ En conclusion du « One Planet Summit », un rendez-vous informel consacré à la biodiversité organisé le 11 janvier à l'Élysée, Antonio Guterres, secrétaire général de l'ONU, a déclaré : *« Le temps est venu de mettre un prix sur le carbone, d'arrêter de construire de nouvelles centrales à charbon, de mettre fin aux subventions pour les énergies fossiles, de transférer la charge fiscale des contribuables aux pollueurs. »* **L. C.**

EN DEUX MOTS

TARA. La goélette *Tara* est repartie en mission, cette fois à destination des côtes chiliennes et de l'Atlantique Sud pour ausculter, jusqu'en 2022, la réaction des microbiomes face au réchauffement de la planète. **EVEREST.** En désaccord depuis des décennies, la Chine et le Népal ont enfin approuvé une nouvelle mesure de l'altitude de l'Everest : 8848,86 m. **VIANDE ARTIFICIELLE.** Du poulet fabriqué en laboratoire par la start-up Eat Just a été servi pour la première fois dans un restaurant à Singapour, en décembre.

Madagascar va devenir un archipel

GÉOLOGIE Dans quelques millions d'années, Madagascar se trouvera morcelée en plusieurs petites îles. De nouveaux relevés GPS révèlent que le sud de l'île, porté par la plaque Lwandle, se détache tandis que le centre, reposant sur la plaque somalienne, se déplace dans une autre direction, de quelques millimètres par an. Le reste de l'île est sujet à un processus complexe de division qui s'étend jusqu'aux Comores et qui s'achèvera par la formation d'archipels. **J. I.**

SOURCE : D.S. STAMPS, VIRGINIA TECH, BLACKSBURG, ÉTATS-UNIS.

RINA ANDRIANASOLO

Des relevés GPS montrent que le centre et le sud de l'île s'éloignent.

-89 % Le coût des batteries lithium-ion entre 2010 et 2020

ÉNERGIE Selon BloombergNEF, le prix moyen du kilowattheure (kWh) a chuté de 1100 dollars (905 €) en 2010 à 137 kWh (113 €) en 2020 pour les batteries lithium-ion. Il devrait encore descendre jusqu'à 100 dollars (82 €) en 2023, coût déjà atteint pour des batteries fabriquées en Chine. Pour les véhicules électriques, le coût moyen des batteries serait de 126 dollars (103 €) par kWh. **M. N.**

LE SIGLE DU MOIS

L'indice ATMO réactualisé

POLLUTION Créé en 1994, l'indice ATMO a été actualisé le 1er janvier 2021 par le ministère de la Transition écologique afin de donner une évaluation plus fine de la qualité de l'air : il prend désormais en compte les particules fines de moins de 2,5 micromètres (PM2,5) en plus du dioxyde de soufre (SO_2), du dioxyde d'azote (NO_2), de l'ozone (O_3) et des particules de diamètre inférieur à 10 micromètres (PM10). **C. G.**

MAXPPP

QUESTIONS À

Françoise Gaill

Directrice de recherche émérite au CNRS et coordinatrice scientifique de la plate-forme Océan & Climat

« Il faut protéger l'océan sans qui nous serions carbonisés »

Ce mois de janvier a commencé la décennie 2021-2030 dédiée par les Nations unies au développement des sciences océaniques au service d'un développement durable.

Quel est l'objectif de cette initiative ?
Il s'agit de placer l'océan au centre des activités de développement. Avec ses problèmes de surpêche, pollution, réchauffement, acidification, il doit recouvrer sa santé grâce à la science. À mesure que nous découvrons son rôle de régulateur du climat, il s'impose dans le paysage politique. Sans lui, nous serions carbonisés, soumis à des températures insoutenables.

Quelles seront les actions menées ?
L'océan nourrit plus de 3 milliards de personnes, qui doivent développer à son égard une culture de protection. Il faut repenser les pratiques de pêche pour que les espèces survivent et nous alimentent directement, et non d'autres espèces de poissons carnivores en aquaculture. L'ONU estime que les investissements durables dans les océans pourraient produire des bénéfices au moins cinq fois supérieurs à leurs coûts

Que faire face à la menace de l'élévation du niveau des mers ?
Il faut adapter les régions les plus menacées, comme le Pacifique sud-ouest, la façade ouest de la France ou la Californie. Aménager, déménager, gérer le trait côtier et surtout réduire les activités ayant un impact sur le climat. L'expérience des uns soutiendra l'action des autres. Et les nouvelles pratiques deviendront les traditions de demain.

Propos recueillis par S. R.

+75% Le bond des interventions pour dératisation en 2020

ÉTHOLOGIE Le confinement a contraint les rats des villes à changer leurs habitudes : leurs sources de nourriture comme les poubelles des parcs ou des restaurants s'étant taries, ils ont dû se rapprocher des logements estime le syndicat 3D (dératisation, désinsectisation, désinfection). 32 % des Français affirment avoir été confrontés à l'animal dans leur habitation. **L. C.**

UNIVERSITY OF GUELPH

Dans sa bouche, cette abeille transporte de la bouse (flèche) pour enduire l'entrée de la ruche.

L'inavouable arme des abeilles

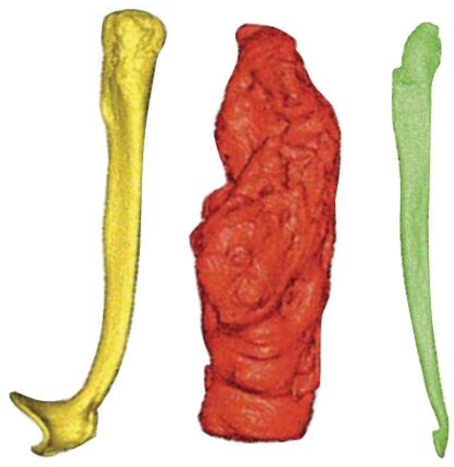
APIDOLOGIE Pour parer les mortelles attaques des frelons géants, des abeilles asiatiques *Apis cerana* ont trouvé une parade originale, même si peu ragoûtante. En fouillant le sol, elles ramassent des bouses, fientes et autres crottes dont elles enduisent les entrées de leur ruche. Ce comportement qui n'avait jamais été documenté jusque-là permettrait de limiter les effractions de plus de 80 %, l'odeur faisant fuir les assaillants des ruches. **H. R.**

SOURCE : HEATHER MATTILA, WELLESLEY COLLEGE, ÉTATS-UNIS.

L'os du pénis, un extracteur à sperme

ZOOLOGIE Chez le ratel, l'os pénien en forme de cuiller servirait à évacuer le sperme de concurrents lors des copulations multiples. Son aspect aurait évolué ainsi pour que les mâles assurent leur paternité, d'après l'analyse 3D de 82 os de pénis provenant de différents carnivores. **R. M.**

SOURCE : CHARLOTTE BRASSEY, MANCHESTER METROPOLITAN UNIVERSITY, ROYAUME-UNI.



CHARLOTTE A. BRASSEY ET AL.

L'os pénien du ratel (à gauche) diffère de ceux des autres carnivores (à droite, lion et marte) par sa forme de cuiller.

RITTIK DEB

En se plaçant dans un trou, préalablement ménagé dans une feuille, l'insecte accroît le volume de son appel.

Des grillons inventent le mégaphone pour femelles

ENTOMOLOGIE Chez les grillons *Oecanthus henryi*, les plus petits mâles utilisent de larges feuilles comme des mégaphones pour amplifier leurs appels sonores en vue d'attirer les femelles. Celles-ci sont en effet censées favoriser les plus grands mâles, ceux aux chants les plus puissants, pour assurer la survie de l'espèce. En faisant simplement un trou dans une feuille et en s'y plaçant, les insectes voient le volume de leurs appels augmenté de 8 à 12 décibels. **A. T.**

SOURCE : RITTIK DEB, INDIAN INSTITUTE OF SCIENCE, INDE.

Découverte d'un serpent inconnu

Un surprenant spécimen du genre *Achalinus* a été identifié au Viêt Nam.

HERPÉTOLOGIE Alors qu'ils travaillaient dans le district de Bac Mê, au Viêt Nam, des herpétologistes vietnamiens et américains ont collecté un serpent pour le moins surprenant. Des analyses génétiques et des observations morphologiques ont permis de confirmer qu'il s'agit d'une espèce jusque-là inconnue du genre *Achalinus*.

Ce nouveau serpent se caractérise par ses 28 dents de taille identique sur la mâchoire supérieure, ainsi que par des écailles dorsales elliptiques, qui ne se chevauchent pas. Il a été baptisé *Achalinus zugorum* en l'honneur du couple d'herpétologistes américains Patricia et George Zug.

Pour le moment, les scientifiques ignorent encore tout de son écologie, de son comportement ou encore de son régime alimentaire. Il est aussi trop tôt pour définir si l'espèce est menacée. Leur nature discrète pourrait sans doute expliquer pourquoi ces spécimens sont si rarement aperçus *« et par conséquent pourquoi les études concernant l'écologie et l'histoire naturelle d'*Achalinus *sont quasi inexistantes »*, remarquent les chercheurs. **A.-S. T.**

ARYEH H. MILLER

La nouvelle espèce (à gauche, vue ventrale) se caractérise par ses écailles dorsales elliptiques (à droite).

PUBLICITÉ

Fonctionnement du cerveau

Mémoriser, raisonner, anticiper, planifier, comprendre… les capacités du cerveau sont illimitées.

Au rythme du cerveau

Le cerveau émet en permanence des ondes dont la fréquence dépend de son activité. Eveil, sommeil, phase intense de réflexion : pour chaque état cérébral, l'activité neuronale est caractérisée par un type d'onde.

Ondes alpha, bêta, gamma : leur rôle est complexe et leur émission par le cerveau dépend de nombreux facteurs, comme l'état psychologique ou encore l'alimentation.

Des études récentes ont par exemple montré le lien étonnant entre Thé vert et ondes alpha. Les feuilles de Thé vert contiennent naturellement une substance appelée L-théanine. Malgré son nom, elle n'a aucun lien avec la théine et ne provoque aucune excitation, bien au contraire. La L-théanine régule la production d'ondes alpha : en situation d'effort intellectuel prolongé, elle est capable de diminuer leur production par le cerveau, ce qui favorise la mémorisation et la concentration. À l'inverse, si le cerveau se trouve en phase d'endormissement, elle stimule leur émission, d'où un effet relaxant propice au sommeil.

Théorie des signatures

La Théorie des Signatures était une méthode d'observation dans l'Antiquité, selon laquelle l'aspect des plantes était une indication de leurs bienfaits pour le corps. La science moderne a depuis confirmé l'efficacité de certaines plantes sur la partie du corps à laquelle elles ressemblent. Ainsi débarrassée de sa coque, la Noix ressemble fortement à un cerveau. Elle est riche en Omegas et en antioxydants, et plusieurs études ont montré ses bienfaits sur la mémoire.

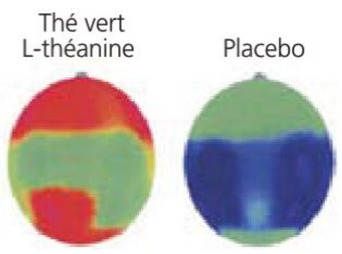
Indispensable irrigation

Le cerveau est incapable de constituer des réserves, et doit donc être alimenté en permanence en glucose. Celui-ci est apporté grâce à un vaste réseau de capillaires, de petits vaisseaux sanguins qui permettent d'irriguer efficacement l'ensemble du cerveau. Leurs fines parois laissent passer le glucose mais aussi l'oxygène indispensable au bon fonctionnement du cerveau. En effet, quelques minutes seulement sans oxygène y entraîne des lésions irréversibles. Là encore, l'alimentation et le mode de vie en général jouent un rôle primordial. La consommation d'aliments riches en antioxydants qui protègent les capillaires, et plus spécifiquement en polyphénols, influence directement le fonctionnement cérébral. Les recherches convergent notamment sur le Pin maritime, dont l'écorce renferme de grandes quantités de proanthocyanidines ou OPC, des polyphénols capables de stimuler la microcirculation sanguine dans les capillaires.

B comme bénéfiques

Le cerveau utilise aussi une multitude de vitamines et minéraux pour fonctionner. Un apport suffisant en vitamines B est particulièrement bénéfique pour maintenir des fonctions cognitives normales (mémoire, concentration, attention). La vitamine B5 par exemple est essentielle à la production de neurotransmetteurs, des substances chimiques qui permettent aux signaux électriques de passer d'un neurone à l'autre pour faire circuler l'information.

Le cerveau passé au scanner

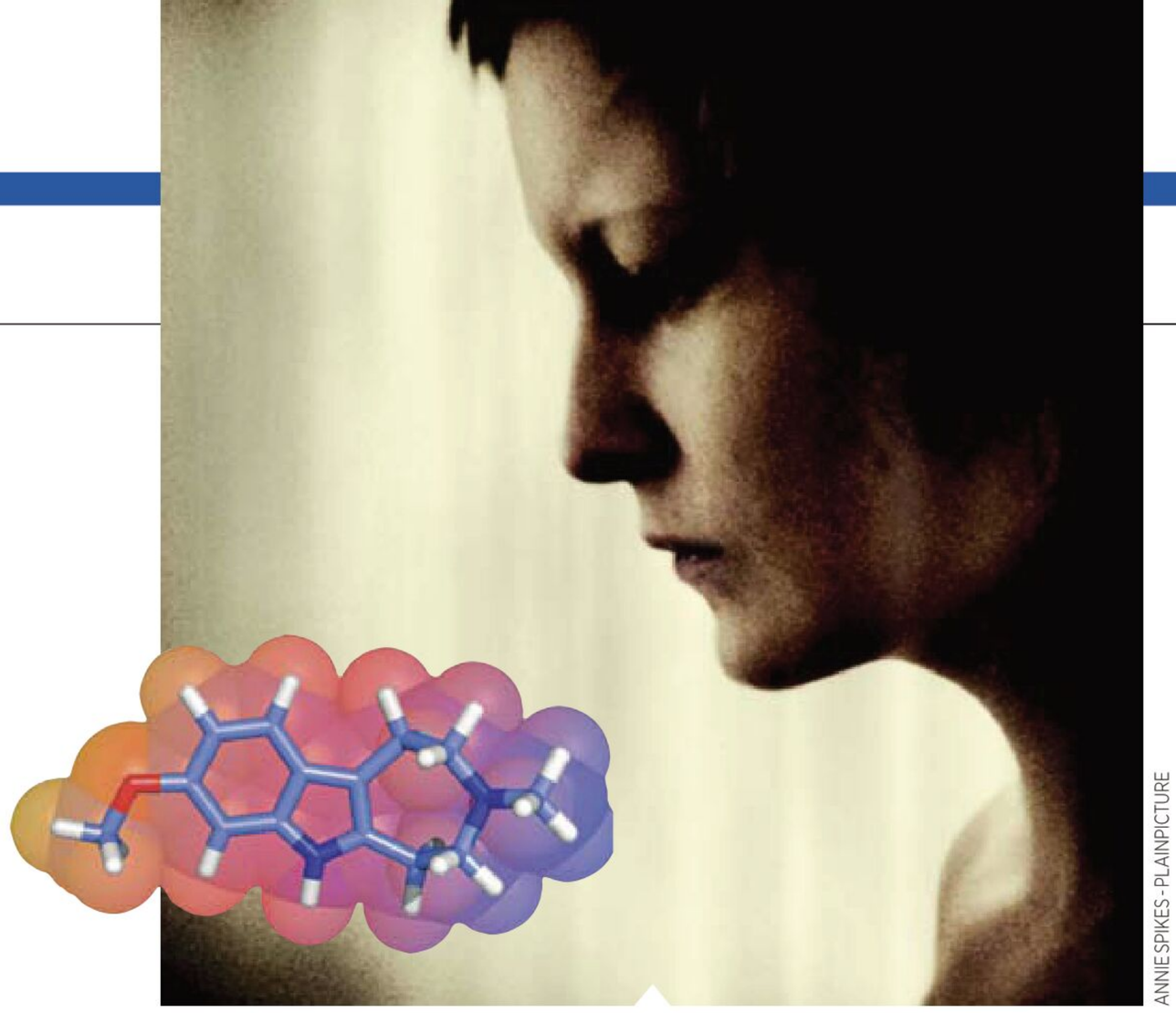


L'activité cérébrale peut être observée grâce au scanner qui met en évidence les zones activées en fonction de l'état dans lequel se trouve le cerveau. La consommation de L-théanine (en rouge) active les zones de la mémoire et de la concentration. Sans L-théanine, ces zones restent inactives (en bleu). Les nombreux travaux de recherche effectués sur le fonctionnement du cerveau ont permis de mettre au point des solutions pour améliorer les fonctions cognitives et les performances intellectuelles. Le laboratoire de recherche végétale New Nordic a mis au point une formule complètement naturelle à base de plantes et vitamines. Baptisée **Cerveau Clair**, elle contient des extraits concentrés de Thé vert, de Noix, de Pin maritime et de Grenade, associés à des vitamines et de l'Iode pour optimiser les performances cérébrales. Ces actifs sont capables d'atteindre le cerveau en quelques heures et sont efficaces sur le long terme. Ils sont donc indiqués pour stimuler les capacités intellectuelles, la concentration et la mémoire, notamment en période de révisions ou d'examens, mais aussi pendant des programmes de plusieurs mois. Les actifs de **Cerveau Clair** atteignent rapidement le cerveau, pour une efficacité en moins d'une heure. Réservé aux adultes de plus de 15 ans.

Cerveau Clair 60 cp est disponible en pharmacie et espaces diététiques sous le code **ACL 295 18 63**
Questions ? Les experts New Nordic vous répondent au 01 85 11 34 34 (tarif local).
www.vitalco.com

Un analogue d'une drogue contre la dépression

Des chimistes sont parvenus à synthétiser une molécule psychoactive qui ne suscite pas d'effets indésirables.



ANNIE SPIKES - PLAINPICTURE

Baptisée tabernanthalog, la nouvelle molécule synthétisée conserve les propriétés anxiolytiques de l'ibogaïne mais sans ses effets secondaires.

PHARMACOLOGIE Une molécule semblable à la psilocybine présente dans les champignons hallucinogènes pourrait être un traitement efficace contre la dépression et l'anxiété, ainsi que contre les dépendances à l'alcool et à divers opioïdes. Il s'agit de l'ibogaïne, un alcaloïde issu d'un arbuste poussant en Afrique de l'Ouest classé comme stupéfiant en France et dans de nombreux autres pays.

Toutefois, son efficacité s'accompagne d'effets secondaires, psychoactifs et cardiaques en particulier, qui restreignent son intérêt thérapeutique. D'où l'importance des résultats obtenus par des chimistes de l'université de Californie à Davis (États-Unis). Ceux-ci sont parvenus à synthétiser une molécule dotée des propriétés anxiolytiques et anti-addictives de l'ibogaïne sans provoquer d'effets indésirables — sur des modèles animaux tout du moins. Des groupements chimiques de l'ibogaïne (appelés méthyle et méthoxyle) ont pour cela été déplacés, d'autres ayant été retirés. Baptisée « *tabernanthalog* », la molécule a fait l'objet d'un brevet et ses performances seront examinées en détail par la start-up californienne Delix Therapeutics. **F. D.**

IL A DIT

« La dengue, le chikungunya ou le zika ne sont plus l'apanage des départements d'outre-mer »

Pascal Boireau, directeur du Laboratoire de santé animale à l'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses), lors d'un colloque consacré à la menace que représente le plus redoutable porteur de ces maladies, le moustique tigre *Aedes albopictus*, qui a désormais colonisé 58 départements métropolitains.

De la musique antidouleur au bloc opératoire

CHIRURGIE Des médecins allemands viennent de montrer qu'opérer en musique permet de réduire les douleurs post-opératoires. La diffusion de mélodies pendant les opérations de une à trois heures sous anesthésie générale a permis de réduire de 25 % les douleurs des patients et de 26 % leur besoin de médicaments analgésiques, durant les 24 heures suivant l'opération. **A. T.**

SOURCE : HARTMUTH NOWAK, UNIVERSITÉ DE LA RUHR À BOCHUM, ALLEMAGNE.

Penser positif pour tenir ses résolutions

PSYCHOLOGIE **« Perdre du poids » et « se mettre au sport » sont les résolutions les plus répandues parmi les Français, mais la seconde aurait plus de chances de réussite. Une étude révèle en effet que les personnes qui formulent leurs résolutions de manière positive étaient 59 % à les avoir respectées, contre 47 % lorsqu'elles étaient axées sur l'évitement. *« Il est plus facile de remplacer un comportement par un autre que de l'effacer »*, expliquent les auteurs. C. G.**

SOURCE : MARTIN OSCARSSON, UNIVERSITÉ DE STOCKHOLM, SUÈDE.

GETTY IMAGES

◀ **Une résolution** formulée de façon positive a plus de chance d'être tenue.

CLÉMENT CARBILLET/BIOSPHOTO

Deux molécules combinées ont permis d'inhiber les enzymes présentes dans le venin.

Un antidote contre les venins de serpent

TOXICOLOGIE La combinaison de deux molécules peut protéger contre les venins de serpents, responsables d'au moins 100 000 décès par an. L'antidote, qui reste à tester chez l'humain, consiste en deux inhibiteurs d'enzymes présentes dans le venin, le marimastat et le varespladib. Leur injection à des souris un quart d'heure après celle de venin a permis de sauver tous les rongeurs. **P. K.**

SOURCE : L.-O. ALBULESCU LIVERPOOL SCHOOL OF TROPICAL MEDICINE, ROYAUME-UNI.

17 Le nombre de régions du génome liées à l'anévrisme

ANGIOLOGIE **Une étude génétique d'ampleur sans précédent (sur plus de 300 000 personnes) a permis d'identifier 11 nouvelles régions du génome humain liées au risque de développer un anévrisme cérébral, qui s'ajoutent aux six déjà connues : majoritairement des portions d'ADN qui s'expriment dans les cellules constituant les tissus internes des vaisseaux sanguins.** **A. T.**

SOURCE : MARK K. BAKKER, UNIVERSITÉ D'UTRECHT, PAYS-BAS.

Il faut surveiller la différence de tension entre les deux bras

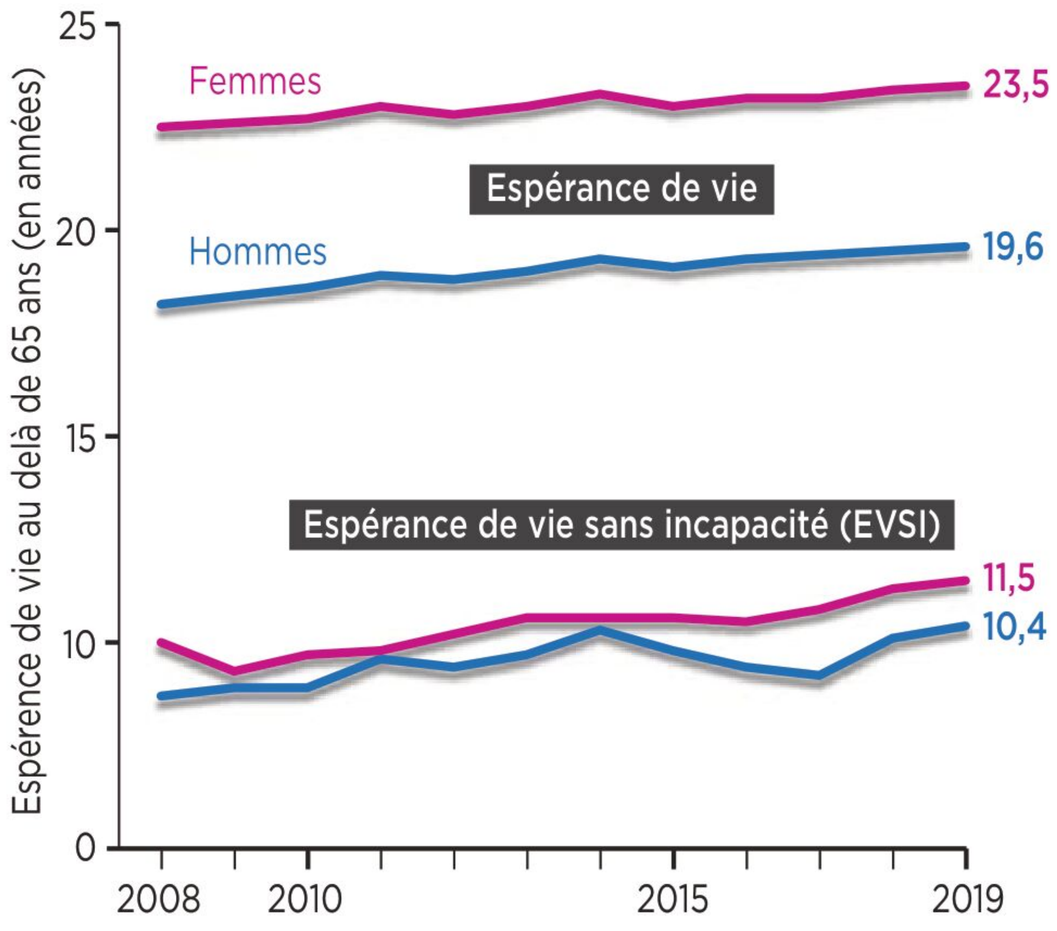
CARDIOLOGIE Une différence de pression artérielle entre les deux bras est liée à un risque accru de crise cardiaque, d'accident vasculaire cérébral ou de décès. C'est la conclusion d'une méta-analyse basée sur 54 000 adultes en Europe, aux États-Unis, en Afrique et en Asie. Peu suivies, les recommandations préconisent bien de relever la tension dans les deux bras. **H. J.**

SOURCE : CHRISTOPHER CLARK, UNIVERSITÉ D'EXETER, ROYAUME-UNI.

Vivre plus longtemps et vieillir mieux

DÉMOGRAPHIE L'espérance de vie sans incapacité (EVSI, c'est-à-dire sans être limité dans ses activités quotidiennes, comme pouvoir soulever des charges) à 65 ans a augmenté en France d'un an et demi pour les femmes et de 1 an et 8 mois pour les hommes depuis 2008. La France obtient ainsi l'un des meilleurs scores de l'Union européenne avec 11,5 années en moyenne pour une femme et 10,4 pour un homme. **M. d. V.**

SOURCE : THOMAS DEROYON, DIRECTION DE LA RECHERCHE, DES ÉTUDES, DE L'ÉVALUATION ET DES STATISTIQUES (DREES).



Depuis 2008, l'espérance de vie à 65 ans sans être limité dans ses activités quotidiennes a augmenté d'un an et six mois pour les femmes et d'un an et huit mois pour les hommes.

BRUNO BOURGEOIS

www.lesproduitsdumois.com

Scan me

Vertiges, pertes d'équilibre, instabilité ?

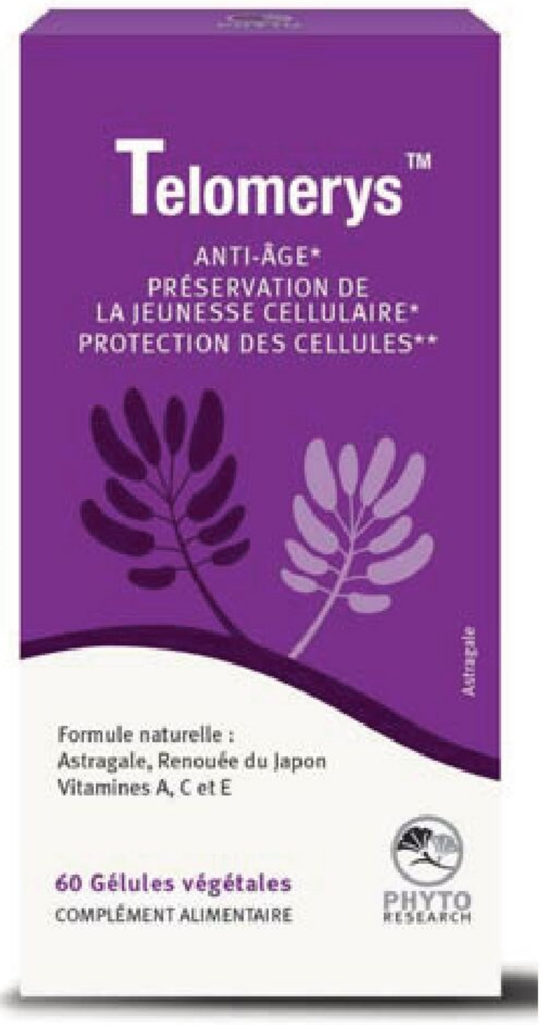
coup de cœur

Vos troubles de l'équilibre impactent votre qualité de vie ? Vos troubles de l'équilibre sont dus à des altérations de la micro-circulation et au stress. Grâce à sa composition Unique et Naturelle, **AUDISTIM® ÉQUILIBRE VA VOUS SOULAGER !** L'écorce de pin maritime (EPM 150®) et le Gingembre améliorent la microcirculation, favorisent l'oxygénation cérébrale et contribuent à une bonne santé vasculaire. La Passiflore, l'Aubépine, le magnésium et le zinc diminuent le stress. Cure de 3 mois minimum. ■ En pharmacie www.audistimpharma.com
/// AUDISTIMPHARMA à votre écoute : 05 56 69 13 84

Reflux, sécrétions, irritations altèrent votre qualité de vie, MUCODISTIM HEMMAGE VOUS SOULAGE !

Raclements persistants dans la gorge, la Lithocétine® et le GABA agissent sur le pH de **l'acidité gastrique** et sur la **réduction du relâchement du sphincter**, permettant ainsi de contribuer à l'élimination des mucosités tout en luttant contre le reflux, l'Inflammation et l'irritation, la quercétine aide à combattre le phénomène allergique. En complément, la Valériane, l'éleuthérocoque, et le magnésium agissent sur le stress et la tension musculaire. Cure de 3 mois minimum. ■ En pharmacie www.audistimpharma.com
/// AUDISTIMPHARMA à votre écoute : 05 56 69 13 84

INNOVATION ANTI-ÂGE



Le laboratoire français **PhytoResearch** a mis au point une **formule naturelle** basée sur les résultats des dernières avancées scientifiques sur l'astragaloside IV, une substance issue de l'Astragale capable de **ralentir le vieillissement cellulaire**.

Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragale à du resvératrol, un **puissant antioxydant**, ainsi que des **vitamines A, C et E**.

Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffisent pour constater une **diminution significative des rides**, une **amélioration des fonctions cognitives** (mémoire, concentration) et un **regain d'énergie**.

■ En pharmacie boîte 60 gél vég - ACL 6024256
Convient aux végétaliens.
Plus d'infos au 01 83 96 83 01 (tarif local) - telomerys.com

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE
Pour paraître dans cette rubrique, R'Médias 01 46 48 85 41 - photos D.R.

WILLY VAN WINGERDEN

Les projectiles avaient peut-être une valeur symbolique.

Des pointes de flèche en os humain

Ces armes, vieilles de 10 000 ans, ont été trouvées au nord de l'Europe.

PRÉHISTOIRE La découverte en a surpris plus d'un : des pointes de projectiles mésolithiques vieilles de 10 000 ans taillées dans des os humains. Échouées sur des plages néerlandaises, ces « pointes barbelées » préhistoriques proviennent du Doggerland, d'anciennes terres émergées qui permettaient durant les glaciations du quaternaire de relier la Grande-Bretagne à l'Europe continentale. Désormais sous les eaux de la mer du Nord, des objets préhistoriques sont régulièrement remontés des fonds par les courants, en même temps que fossiles et silex, et se retrouvent déposés sur les côtes. C'est en tentant de déterminer par des analyses moléculaires du collagène — la principale protéine de l'os — de quelles espèces animales étaient issus dix de ces objets taillés que des chercheurs de l'université de Leyde (Pays-Bas) et du Max-Planck Institute de Leipzig (Allemagne) ont identifié, au milieu de restes de cerf élaphe, deux pointes façonnées dans de l'os humain. Une matière première qui aurait pu être sélectionnée pour des raisons symboliques ou rituelles, estiment les scientifiques. **B. A.**

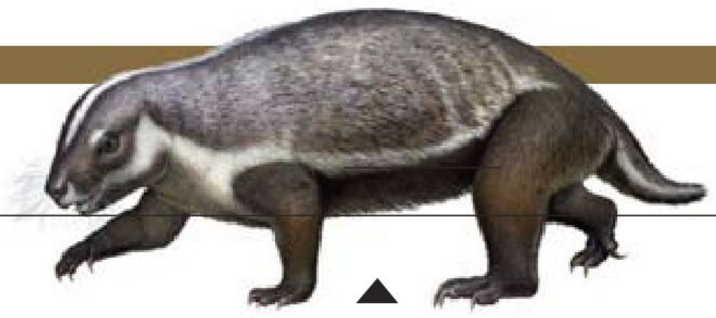
SOURCE : LARS HOLGER PILØ,+ OPPLAND COUNTY COUNCIL, NORVÈGE.

Une machine Enigma refait surface

WWF / SUBMARIS / CHRISTIAN HOWE / AFP

L'objet aurait été jeté à la mer depuis un navire de la Kriegsmarine sur le point de se saborder en 1945.

ARCHÉOLOGIE Alors qu'ils fouillaient le fond de la mer Baltique à la recherche de filets de pêche abandonnés, des plongeurs allemands sont tombés sur une machine Enigma, du nom de ce dispositif de cryptage utilisé par l'armée nazie pendant la Seconde Guerre mondiale. Machine réputée inviolable, l'équipe du Britannique Alan Turing parviendra pourtant à en décrypter le code secret en 1942. **M. B.**



ANDREY ATUCHIN

« Adaletherium hui », le plus gros mammifère du mésozoïque.

Un étrange mammifère du Gondwana découvert à Madagascar

PALÉONTOLOGIE Évoquant le blaireau, l'animal vivait il y a 66 millions d'années à Madagascar au milieu des dinosaures. C'est un représentant des gondwanathériens, des mammifères mal connus de l'hémisphère Sud. Le fossile qui vient d'être révélé (mais découvert en 1999) pèse dans les 3 kg, ce qui en fait le plus gros mammifère connu du mésozoïque. **J. I.**

SOURCE : DAVID KRAUSE, MUSEUM OF NATURE & SCIENCE, DENVER, ÉTATS-UNIS.

La tombe du chancelier Rolin découverte à Autun

ARCHÉOLOGIE La tombe de Nicolas Rolin (1376-1462), bras droit du duc de Bourgogne Philippe le Bon et fondateur des hospices de Beaune, vient d'être localisée lors de fouilles préventives à Autun, en Saône-et-Loire. La sépulture, très endommagée, contenait encore suffisamment d'indices — comme un éperon doré — pour identifier la dernière demeure du chancelier immortalisé par le peintre flamand Jan Van Eyck. **M. B.**

AKG

Nicolas Rolin peint par Jan Van Eyck.

L'œil de Lascar

LE PAYS DE PASTEUR, qui développa le vaccin contre la rage en 1885, est devenu celui du vaccino-scepticisme : seul un Français sur deux est décidé à se faire vacciner contre le Covid-19 selon une étude menée par Ipsos mi-octobre 2020 *(lire p. 74)*. **O. L.**

NOUVELLE FORMULE

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

Chez votre marchand de journaux et chez votre libraire

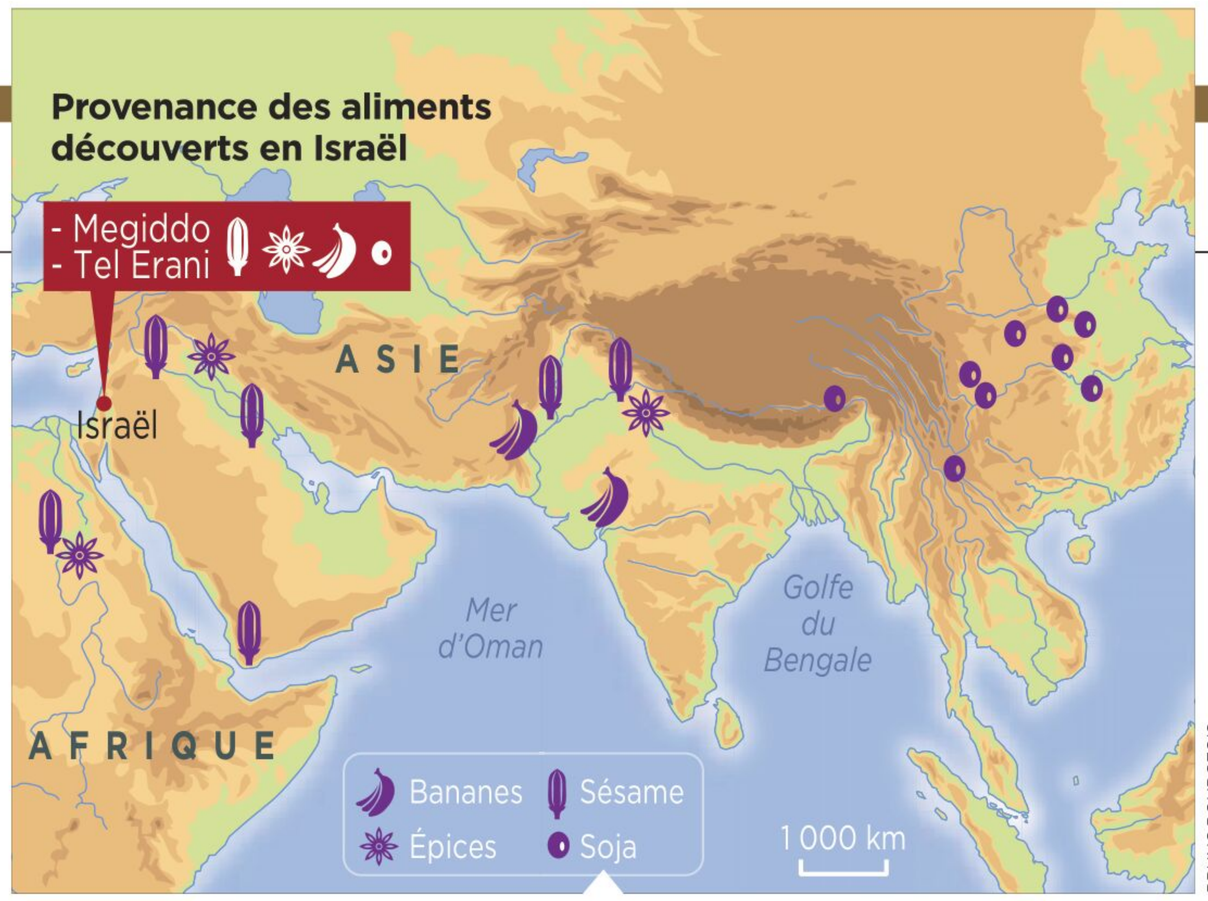
LES 23 SCIENTIFIQUES QUI ONT PARTICIPÉ À CE NUMÉRO

Jean-Pierre Bibring, *astrophysicien,* professeur émérite, université Paris-Saclay
Daniel Boy, *politologue,* directeur de recherche émérite, Fondation nationale des sciences politiques, Paris
Chloé Clavel, *informaticienne*, enseignante-chercheuse, Télécom Paris
Françoise Combes, *astrophysicienne,* Médaille d'or du CNRS, professeure au Collège de France, Paris
Marie Dégremont, *politologue,* chercheuse, Institut d'études politiques, Paris
Jean-Paul Demoule, *protohistorien,* professeur émérite, université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Catherine Dulac, *neurobiologiste,* professeure, université Harvard, états-Unis
François Forget, *planétologue,* directeur de recherche, CNRS, Institut Pierre-Simon-Laplace, Paris
Frédéric Foucher, *physicien,* ingénieur de recherche, CNRS, Centre de biophysique moléculaire, Orléans
Jean-Gabriel Ganascia, *informaticien,* professeur, Sorbonne Université, Paris
Anil K. Gupta, *innovateur,* ancien professeur, Institut indien de management, Ahmedabad, Inde
Keyron Hickman-Lewis, *géologue,* chercheur, Muséum d'histoire naturelle de Londres, Royaume-Uni
Frédéric Landragin, *linguiste,* directeur de recherche, CNRS, école normale supérieure, Paris
Christophe Malaterre, *philosophe des sciences,* professeur, université du Québec à Montréal, Canada
Marie-Christine Maurel, *biologiste et biochimiste,* professeure, Sorbonne Université, Paris
Joseph Moran, *chimiste,* professeur, CNRS, université de Strasbourg
Philippe Nghe, *biochimiste,* maître de conférences, école supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris
Sean Raymond, *astrophysicien,* chargé de recherche, CNRS, laboratoire d'astrophysique de Bordeaux
Théo Ryffel, *informaticien,* doctorant, école normale supérieure, Inria, Paris
Claudio Smiraglia, *géographe,* ancien professeur, université de Milan, Italie
Jean-Sébastien Steyer, *paléontologue,* chercheur, CNRS, Muséum national d'histoire naturelle, Paris
Gabriel Tobie, *planétologue,* chargé de recherche, CNRS, laboratoire de planétologie et géodynamique, Nantes
Frances Westall, *géologue,* directrice de recherche, CNRS, Centre de biophysique moléculaire, Orléans

La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

Les Philistins s'approvisionnaient en Asie du Sud

Des aliments exotiques révèlent l'existence d'un commerce entre le Proche-Orient et l'Asie méridionale et orientale, au deuxième millénaire avant notre ère.



BRUNO BOURGEOIS

Grâce à un vaste réseau commercial, les habitants de l'actuel Israël importaient, dès 1500 avant J.-C., une partie de leur nourriture sur des milliers de kilomètres.

ANTIQUITÉ Il y a 3500 ans, les anciens habitants de l'actuel Israël savouraient déjà des légumineuses, des fruits et des épices importés du sud et de l'est de l'Asie. Christina Warinner, de l'université Harvard (États-Unis) et ses collègues ont analysé les restes de nourriture conservés dans le tartre dentaire de 16 personnes vivant au Proche-Orient au cours du deuxième millénaire avant notre ère. Ils ont détecté des traces de soja, de sésame sur des restes humains provenant du site de Megiddo, et de banane sur un squelette de Tel Erani. *« Ces produits étaient probablement consommés sous forme d'huiles, de fruits secs et d'épices »*, estiment les chercheurs. Les résultats suggèrent qu'un solide réseau commercial s'était développé dès la préhistoire, de l'âge du bronze moyen au début de l'âge du fer (vers 1500 à 1100 avant J.-C.), entre le Proche-Orient et l'Asie du Sud. *« Nous pensions autrefois que les gens obtenaient leur nourriture localement et importaient des pierres précieuses de loin, mais dès l'âge du bronze, ils importaient leur nourriture de partout »*, conclut Philipp Stockhammer, de l'université de Munich (Allemagne). **R. M.**

► **Chez Neandertal** le pouce ne pouvait pas se plier pour saisir un objet.

AMELINE BARDO

« Sapiens vs Neandertal », un pouce de différence

PALÉOANTHROPOLOGIE Face à son cousin Neandertal, il y a 40 000 ans, *Homo sapiens* aurait bénéficié d'un « coup de pouce » de l'évolution. En effet chez les néandertaliens, l'articulation du pouce est plus plate, lui conférant moins de degrés de liberté et le rendant moins précis pour saisir un objet entre le pouce et l'index. **H. R.**

SOURCE : AMELINE BARDO, UNIVERSITÉ DU KENT, ROYAUME-UNI.

INAH / AFP

Scellées au mortier, les têtes garnissaient un râtelier à crânes.

Une nouvelle série de crânes aztèques mise au jour Mexico

ARCHÉOLOGIE Les sous-sols de Mexico (Mexique), l'ancienne Tenochtitlan des Aztèques, ne cessent de livrer de macabres découvertes. Scellés dans des mortiers, 119 nouveaux crânes viennent d'être exhumés. Ils ornaient l'une des deux sinistres tours qui flanquaient les extrémités du Huei Tzompantli découvert en 2017, un « râtelier à crânes » de 30 m de long. **B. A.**

Des vestiges provenant de la pyramide de Kheops dans une boîte à cigares

ÉGYPTOLOGIE Des fragments d'un objet en bois de cèdre, un des trois seuls artefacts découverts dans la pyramide de Kheops (Égypte), que l'on croyait à jamais perdus viennent d'être retrouvés par hasard, dans une boîte à cigares conservée à l'université d'Aberdeen (Écosse) ! Recueillis en 1872 par l'archéologue britannique Waynman Dixon, les fragments de bois avaient été égarés vers 1946. B. A.

UNIVERSITY OF ABERDEEN / AFP

► **Les fragments** avaient disparu depuis 1946.

Sans pouvoir voler, les oiseaux étaient condamnés

PALÉONTOLOGIE Les espèces d'oiseaux inaptes au vol tels que les manchots ou le kakapo étaient quatre fois plus nombreuses avant la dissémination d'*Homo sapiens* sur Terre selon un recensement global des oiseaux éteints depuis 126 000 ans. Elles étaient plus répandues sur beaucoup d'îles dépourvues de mammifères, et la perte de la capacité à voler due à l'absence de prédateur les a rendues très vulnérables. **P. K.**

SOURCE : F. SAYOL, UNIVERSITÉ DE GÖTEBORG, SUÈDE.

GOVERNMENT OF YUKON

Âgée de sept semaines au moment de sa mort, la femelle louveteau avait notamment été nourrie avec du saumon.

Une momie de louveteau dans le pergélisol

PALÉONTOLOGIE Exceptionnellement bien conservée dans le pergélisol, Zhùr est la momie d'une loupiote (louveteau femelle). Retrouvée dans le Yukon, au Canada, elle est vieille de 57 000 ans. L'analyse de son corps indique qu'elle devait être âgée de 7 semaines et qu'elle avait été nourrie peu de temps avant sa mort. Le contenu de l'estomac a livré des restes de nourritures essentiellement d'origine aquatique, en particulier du saumon. **J. I.**

SOURCE : JULIE MEACHEN, UNIVERSITÉ DE DES MOINES, ÉTATS-UNIS.

16 à 40 m La hauteur d'un tsunami qui a touché la côte est-méditerranéenne au néolithique

GÉOLOGIE Des carottages, des mesures et des fouilles sous-marines autour du site de Tel Dor dans le nord-ouest d'Israël ont permis d'identifier une couche géologique trahissant le déferlement d'un paléotsunami qui aurait pu pénétrer les terres sur 1,5 à 3,5 km, contre 300 m pour les autres événements documentés jusqu'ici. Il aurait pu être provoqué par un séisme et un glissement de terrain sous-marin. **J. I.**

SOURCE : GILAD SHTIENBERG, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE, SAN DIEGO, ÉTATS-UNIS.

Un restaurant de « street food » découvert à Pompéi

SIPA

L'établissement servait sans doute du canard, du coq et du porc.

ANTIQUITÉ Un petit stand de nourriture de rue appelé *thermopolium* vient d'être dévoilé à Pompéi par la direction du site archéologique. Les restes de nourriture que ses cuves contiennent livreront prochainement des informations sur les mets consommés il y a plus de deux millénaires dans le monde romain. On soupçonne déjà que des coqs, des canards colverts ou encore du porc y étaient servis, sans doute accompagnés de vin ou de boissons chaudes. **M. B.**

www.sciencesetavenir.fr
www.larecherche.fr

Sciences et Avenir et *La Recherche* au quotidien

ESPACE

Les astrophysiciens sous le ciel du Covid-19

Astronome à l'Iram, l'Institut de radioastronomie millimétrique, Roberto Neri témoigne des défis en cascade que le Covid-19 a fait peser sur la communauté des astrophysiciens : ses commentaires, comme ceux de Florentin Millour, responsable de l'instrument Matisse sur le Très Grand télescope, le VLT du Chili, sont à lire sur le site de **La Recherche**. http://bit.ly/35wF5Nu

ESO

ARCHÉOLOGIE

L'ADN révèle les peuplements

« Avec l'ADN, nous commençons à avoir une idée un peu plus construite de la façon dont l'Europe a été façonnée génétiquement », explique Évelyne Heyer, professeure d'anthropologie génétique du Muséum national d'histoire naturelle. Elle répond aux questions de SCIENCES AVENIR dans un entretien vidéo. sciav.fr/ADN888

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

High-tech Applis de rencontre, c'est du sérieux

SIPA

Une idée reçue veut que les applications de rencontre nuisent aux liens du couple. Au contraire, d'après une étude suisse, les couples formés en ligne ont plus l'intention de fonder une famille. sciav.fr/Appli888

10 minutes

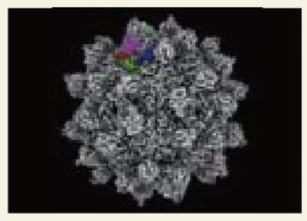
Fondamental *« L'écume de l'espace-temps »*

SPL

Dans son dernier livre, Jean-Pierre Luminet s'interroge : comment décrire l'Univers à ses débuts ? Quelles théories appliquer ? Un panorama indispensable des débuts de l'Univers. sciav.fr/Luminet888

15 minutes

Biologie Des virus tueurs de cancer



OIST & UNIVERSITY OF OTAGO

Les virus oncolytiques, qui attaquent les cellules cancéreuses et épargnent les cellules saines, pourraient bien être l'avenir des thérapies anticancéreuses. sciav.fr/Virus888

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

Cerveau et émotions

Vaincre le stress

La crise sanitaire liée à l'épidémie de Covid-19 met notre santé mentale à rude épreuve. Il est utile de comprendre ce qui se passe dans notre cerveau et tout notre corps pour mieux lutter contre les effets négatifs de ce stress. En suivant cinq conseils qui redonnent moral et vitalité.

Dossier réalisé par
Camille Gaubert, Sylvie Riou-Milliot,
et Elena Sender

Confinés, déconfinés, reconfinés... Depuis près d'un an, plus de 4 milliards d'individus sur la planète sont confrontés à une situation sanitaire inédite. Les facteurs de stress aigu ont été multiples : peur de la maladie pour soi-même comme pour ses proches ou autrui, deuil... Fait supplémentaire, la pandémie de Covid-19 s'est installée sur le long terme, le virus Sras-CoV-2 revenant par vagues successives mettant à chaque fois un peu plus à mal notre santé physique et mentale. Après une phase initiale de sidération, un état de stress chronique s'est finalement imposé à tous. Ce stress ne cesse de nous envahir selon des mécanismes complexes *(voir l'infographie pp. 30-31)*. Et, fait inédit dans le monde moderne, la « distanciation sociale » rend impossible les embrassades. Résultat : les indicateurs de détresse psychologique — fatigue, anxiété, dépression, troubles du sommeil, addictions — sont tous à l'orange, voire au rouge pour les personnes les plus vulnérables ou déjà fragilisées.

Comment faire face à la vague psychiatrique à venir, se demandait en novembre 2020 la fondation Fondamental. Avec plusieurs psychiatres, elle s'inquiétait des moyens de prise en charge, la discipline étant déjà en crise entre fermetures des lits, manque de soignants et consultations saturées. Nul doute qu'il faille se préparer à un long marathon avant que nous en ayons fini avec la pandémie, car il faudra des mois avant que les effets du vaccin doublés des mesures barrières ne se fassent sentir. Afin de passer au mieux le cap, *Sciences et Avenir* détaille les fondements scientifiques de cinq leviers *(p. 32)* pour faire face à la crise dans notre vie quotidienne. ■ **S. R.-M.**

ÉMILE LOREAUX/ HANS LUCAS POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

MAINTENONS LES LIENS SOCIAUX p. 33

PRENONS SOIN DE NOTRE SOMMEIL p. 35

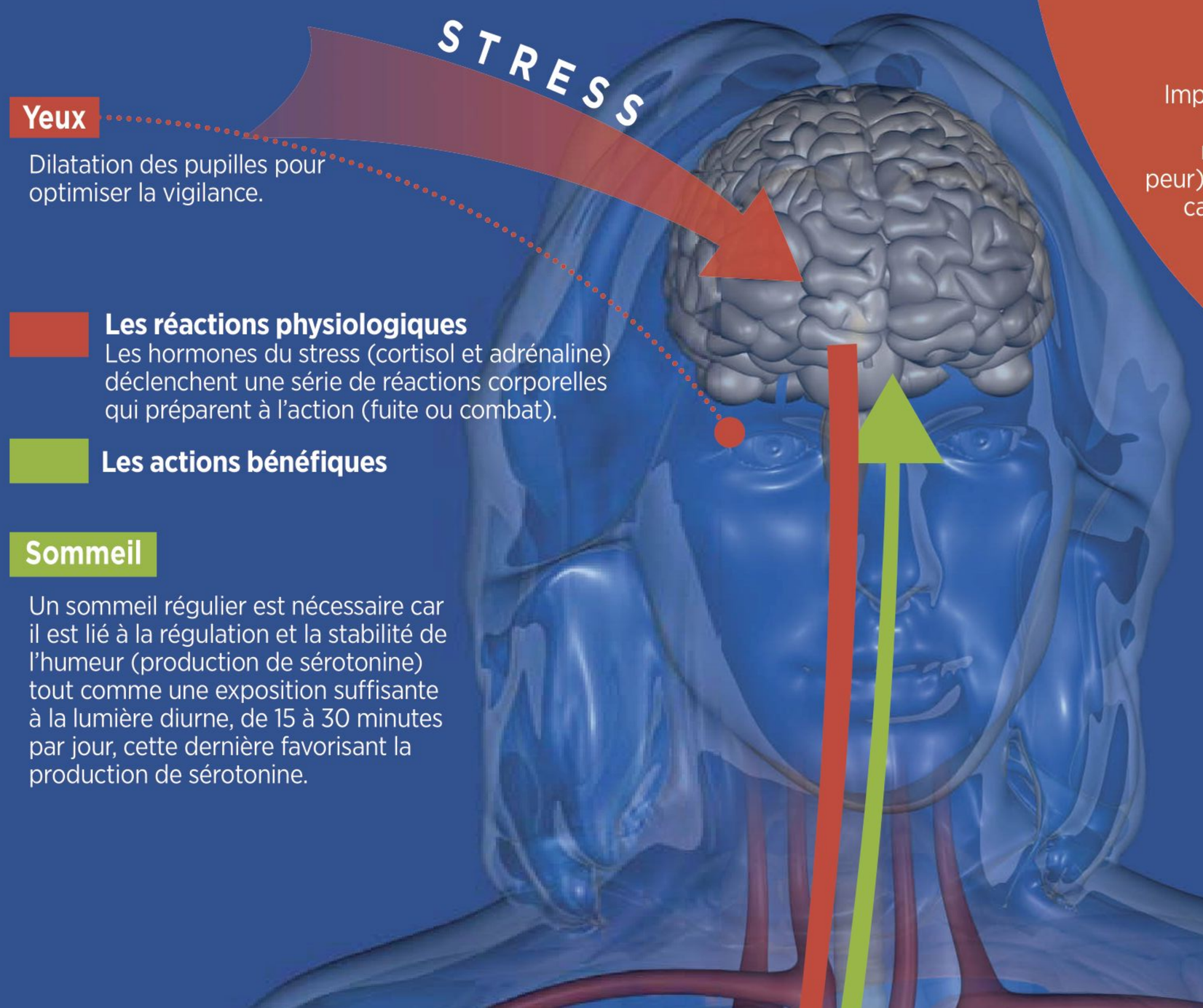
CHOISISSONS BIEN NOTRE ALIMENTATION p. 32

PRIVILÉGIONS L'ACTIVITÉ PHYSIQUE p. 34

SACHONS NOUS DÉTENDRE p. 34

Comment contrôler son stress

Le stress engendre une chaîne de réactions physiologiques. S'il se prolonge dans le temps, il devient « chronique » et peut alors avoir des effets pathologiques, physiques comme mentaux. Il peut favoriser les maladies cardiaques, le diabète, les ulcères, mais aussi altérer l'état émotionnel, les fonctions cognitives et conduire à des troubles psychologiques. Des contre-mesures au quotidien permettent d'en limiter les dégâts, en stimulant la production de neuromédiateurs du bien-être (sérotonine, dopamine, ocytocine et endorphines).



Yeux
Dilatation des pupilles pour optimiser la vigilance.

Les réactions physiologiques
Les hormones du stress (cortisol et adrénaline) déclenchent une série de réactions corporelles qui préparent à l'action (fuite ou combat).

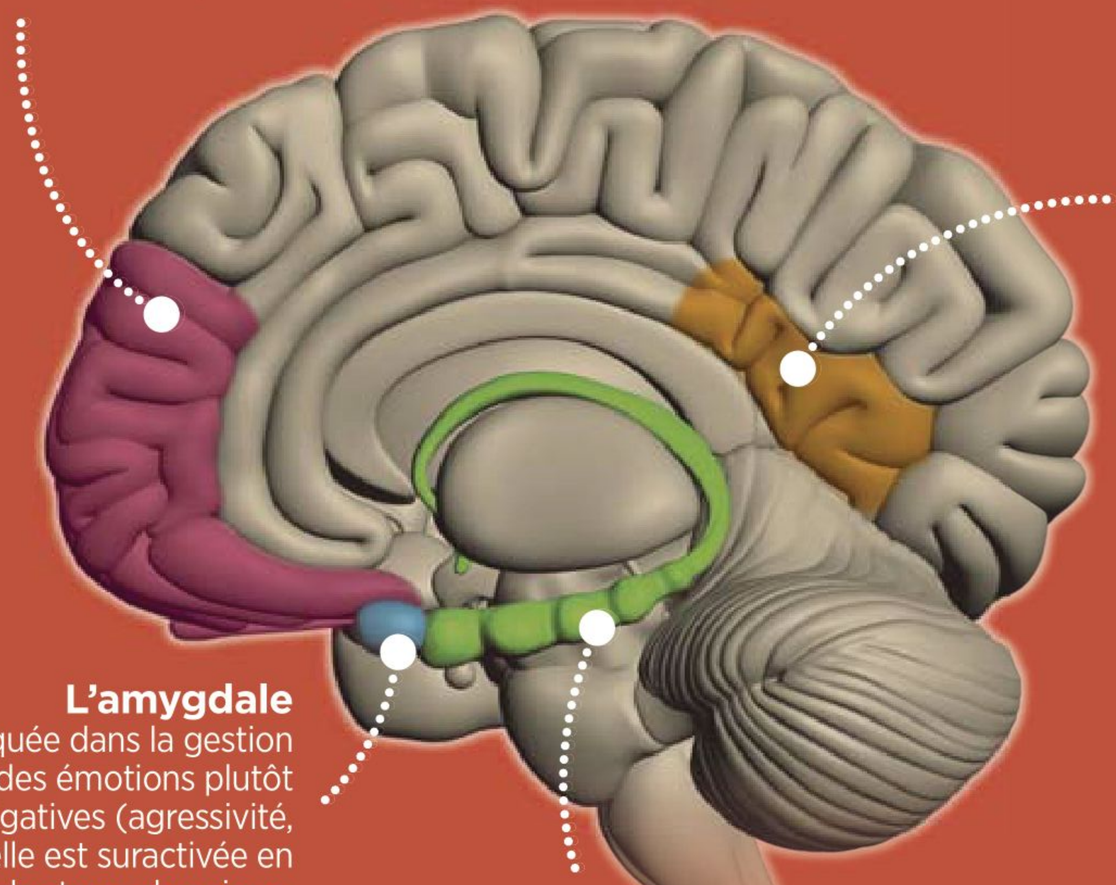
Les actions bénéfiques

Sommeil

Un sommeil régulier est nécessaire car il est lié à la régulation et la stabilité de l'humeur (production de sérotonine) tout comme une exposition suffisante à la lumière diurne, de 15 à 30 minutes par jour, cette dernière favorisant la production de sérotonine.

Les 4 zones cérébrales touchées

Le cortex préfrontal
Siège des décisions et de l'action, il fonctionne au ralenti. Le volume de la substance grise (connexions) diminue quand le stress devient chronique. Les sujets ont plus de mal à contrôler leurs émotions, à prendre des décisions et à s'adapter aux situations.



Le cortex cingulaire antérieur
Courroie de transmission entre les structures limbiques (hippocampe et amygdale) et le cortex préfrontal, il n'assure plus efficacement son rôle de médiateur. Les émotions sont difficilement régulées.

L'amygdale
Impliquée dans la gestion des émotions plutôt négatives (agressivité, peur), elle est suractivée en cas de stress chronique, rendant le sujet hypersensible à tout stimulus négatif, irritable et anxieux.

L'hippocampe
Cette structure, qui joue un rôle central dans les processus de mémorisation et siège de la neurogenèse (production de nouveaux neurones) est altérée par un contact prolongé avec les hormones du stress (cortisol et adrénaline). La neurogenèse est ralentie et le sujet mémorise moins bien.

Détente

Des activités de détente comme la méditation ou le yoga font chuter le cortisol (hormone du stress) et augmenter la sérotonine (bonne humeur) et les endorphines (analgésique). Toute nouvelle activité plaisante libère de la dopamine (plaisir, motivation).

Lien social

Des liens sociaux positifs, et surtout le rire, favorisent la production de sérotonine (bonne humeur), d'endorphines et de dopamine (plaisir). Les câlins produisent de l'ocytocine (tendresse, attachement).

Système nerveux sympathique

Il est activé par le cerveau qui donne l'alerte en cas de stress. Il stimule alors plusieurs réactions dont l'activation des glandes surrénales.

Rétrocontrôle

Le système nerveux parasympathique apaise la réponse physiologique lorsque l'événement stressant est passé.

Poumons

Augmentation de la fréquence respiratoire pour mieux oxygéner le cerveau.

Cœur

Augmentation du rythme cardiaque et de la pression artérielle pour mieux oxygéner le cerveau.

Circulation sanguine

Augmentation de la pression artérielle (*voir plus bas*).

Muscles

Augmentation du tonus musculaire pour se préparer à l'action.

Activité physique

Elle favorise la libération d'endorphines (antidouleurs) et de facteurs neurotrophiques (meilleure connexion des neurones), ainsi que de la sérotonine (humeur positive), et fait baisser le cortisol.

Glandes surrénales

Elles libèrent les « hormones du stress », cortisol et adrénaline.

Foie

Synthèse de glucose pour augmenter l'apport énergétique.

Système digestif

Ralentissement de la digestion, coûteuse en énergie.

Alimentation

Manger sainement (varié, équilibré) entretient un bon microbiote intestinal qui est à l'origine de la production de plus de 90 % de la sérotonine.

BRUNO BOURGEOIS

Cinq façons de résister au mal-être

Nous ne sommes pas démunis face au stress chronique. De bonnes habitudes de vie permettent d'agir sur ses effets délétères. Études à l'appui.

ÉMILE LOREAUX/ HANS LUCAS POUR SCIENCES ET AVENIR- LA RECHERCHE

C'EST UN FAIT, la crise sanitaire du Covid-19 et ses deux confinements ont lourdement affecté notre santé physique et mentale comme le prouve l'enquête nationale Coviprev de Santé publique France. Pour faire face, nous n'avons pas d'autre solution que trouver au quotidien des supports efficaces scientifiquement validés sur lesquels s'appuyer. Revue de détail avec cinq recommandations.

1 Alimentation : se préparer des assiettes antistress

Être attentif au contenu de ses assiettes permet de diminuer les risques de stress, de dépression ou d'anxiété grâce au microbiote intestinal, ces quelque 10 000 milliards de bactéries qui peuplent notre système digestif. Sa composition, elle-même influencée par notre régime alimentaire, joue sur nos humeurs et nos comportements. Il est d'ailleurs à l'origine de la production de plus de 90 % de la sérotonine, neurotransmetteur impliqué dans la régulation du sommeil, de l'appétit, de l'humeur et de la douleur (1). Outre la dépression, des études (2) ont relié les déséquilibres de la flore à l'apparition d'autres troubles (maladie d'Alzheimer, autisme, sclérose en plaques). De récents travaux menés sur la souris à l'Institut Pasteur (3) suggèrent même d'associer des probiotiques aux antidépresseurs, pour favoriser le développement de « psychobiotiques », c'est-à-dire des bactéries capables de soigner certaines dépressions. Reste à démontrer leurs effets chez l'humain, une revue récente de la littérature appelant à la prudence (4).

En attendant, la « psychiatrie nutritionnelle », qui étudie l'impact de l'alimentation sur le métabolisme et le fonctionnement du cerveau, a confirmé les bénéfices du régime méditerranéen, plus riche en légumes, fruits et céréales. Son adoption permet une diminution de 33 % du risque de dépression, d'après une étude de l'Inserm menée en 2018 (5). Ce type de régime semble également prévenir l'anxiété. Inversement, une alimentation riche en acides gras saturés, sucres, alcool, charcuteries et produits raffinés est à éviter. En cause, l'inflammation généralisée (*voir* S. et A. n° 887, *janvier 2021*) due à la production en excès de molécules biologiques pro-inflammatoires, les cytokines. La Société internationale pour la recherche en psychiatrie nutritionnelle suggère pour sa part d'enrichir notre alimentation en acides gras oméga-3 (poisson), zinc et vitamines B et D, en raison *« des nombreuses activités modulatrices neurochimiques potentiellement bénéfiques dans la gestion des troubles mentaux »* (6). Des effets là encore à confirmer. On peut aussi rajouter des flavonols, des antioxydants neuroprotecteurs que l'on trouve dans le chocolat noir, les pommes et les brocolis, jouant un rôle dans la protection des fonctions cognitives (7).

UNIVERSITÉ DE LOUVAIN

« L'être humain est fondamentalement social. Si on lui enlève cette composante, il ne peut plus vivre »

Bernard Rimé, directeur de recherches à l'Université catholique de Louvain à Ottignies-Louvain-la-Neuve (Belgique)

Autant de pistes à prendre en considération pour se préparer avec soin des assiettes « antistress » par temps de pandémie. À l'inverse : il faut éviter au maximum le grignotage pour compenser l'ennui et lutter contre l'anxiété. Une tentation qui ne touche pas que les personnes atteintes de troubles de conduites alimentaires (TCA) comme la boulimie : selon l'étude Coviprev (8), 27 % des Français ont déclaré avoir pris du poids pendant le premier confinement, avec un gain moyen de 2,5 kg. Reste que les effets directs de l'alimentation sur le stress demeurent complexes à interpréter, car ils se confondent avec ceux du style de vie (activité physique, sommeil), et de la génétique. Une certitude cependant : même si certains aliments semblent jouer sur l'état mental, il n'existe pas de « superaliment antistress ». Rien ne vaut manger varié et équilibré. **C. G.**

(1) *Nature Microbiology*, 2020. (2) *Nature*, 2020. (3) *Nature Communications*, 2020. (4) *Clinical Nutrition*, 2020. *(5) Molecular Psychiatry*, 2018. (6) *The Lancet Psychiatry*, 2015. (7) *Frontiers in Nutrition*, 2017. (8) sciav.fr/888Coviprev

2 Renforcer les liens sociaux vitaux

« L'être humain est fondamentalement social. Si on lui enlève cette composante, il ne peut plus vivre », assure Bernard Rimé, directeur de recherche à l'Université catholique de Louvain, à Ottignies-Louvain-la-Neuve (Belgique), spécialiste du partage social des émotions. L'absence de relations sociales provoquerait dans le cerveau une réaction semblable à celle engendrée par la faim, selon l'étude publiée en 2020 dans *Nature Neuroscience* par Livia Tomova, du Massachusetts Institute of Technology à Cambridge (États-Unis). En effet, l'observation par IRM fonctionnelle du cerveau de 40 personnes mises à l'isolement pendant dix heures ou ayant jeûné, a permis de découvrir que leur cerveau réagit de la même façon devant des images de nourriture ou de groupes d'amis. *« Nos résultats soutiennent l'idée selon laquelle l'isolement aigu provoque une "faim*

POUR EN SAVOIR PLUS

- **Cellule nationale Covid-19 :** sciav.fr/888StopBlues et numéro vert 0.800.13.00.00.
- **Site national d'informations sur la santé mentale :** sciav.fr/888Psycom
- **Numéro d'écoute du Samu social :** 0.800.19.00.00 et sciav.fr/888Samusocial
- **Croix Rouge chez vous (écoute et aide aux personnes isolées et vulnérables) :** 09.70.28.30.00.
- **Site Covid écoute de la fondation Fondamental :** covidecoute.org
- **SOS Amitié :** sos-amitie.com et 09.72.39.40.50
- **Pour les soignants** La plate-forme nationale de l'association Soins aux professionnels de santé (SPS) : 0.805.23.23 26.

PIROSKA ÖSTLIN

« Faire entrer l'art dans sa vie par le biais d'activités telles que la danse ou le chant donne une clé supplémentaire pour améliorer sa santé physique et mentale »

Piroska Östlin,
directrice par intérim
de l'OMS-Europe

sociale" », concluent les auteurs. Un manque qui pourrait être dû à la baisse d'ocytocine, cette neurohormone liée aux interactions sociales, clé du bien-être *(voir l'infographie pp. 30-31)*. Que faire pour renforcer les liens sociaux en cette période d'isolement imposé ? « *Il faut partager le plus possible d'émotions positives*, assure Bernard Rimé. *Car vivre une émotion positive augmente l'ouverture cognitive (être plus ouvert à l'expérience, à la créativité) et sociale (être plus ouvert à autrui)*. » Mais aussi favoriser le partage de toutes sortes d'émotions, ainsi que des expériences émotionnelles collectives (cours, discussions, actions communes...), éviter la focalisation sur soi et la rumination mentale en s'occupant d'autrui. **E. S.**

3 Activité physique : chaque mouvement compte

« *Restez chez vous* » : la consigne gouvernementale a directement encouragé la sédentarité, ennemi bien connu de notre santé. Or, « *chaque mouvement compte* », comme l'a rappelé l'OMS. Il est ainsi primordial de continuer à marcher, courir, s'étirer (1). Autant de mouvements qui mobilisent de nombreuses articulations du corps, le cœur, les poumons mais aussi le cerveau. Il n'est jamais inutile de le rappeler, bouger est excellent pour le moral et il n'y a pas de meilleur antistress que l'activité physique, quelle que soit son intensité. Outre la réduction du risque d'obésité, de maladie cardio-vasculaire, de diabète et de certains cancers, sa pratique régulière réduit le stress, l'anxiété et prévient même la dépression, comme l'ont démontré de nombreux travaux (2). À condition d'y consacrer au moins trente minutes quotidiennes. Dernier avantage, « se bouger » participe au réveil de l'estime de soi. Sans oublier les bienfaits des liens sociaux, les rencontres et le plaisir de l'émulation dans le cas d'une pratique collective quand elle est possible. **S. R.-M.**

(1) sciav.fr/888OMS
(2) sciav.fr/888Depression

4 Apprendre à se détendre

Lapalissade : pour faire baisser le stress il faut... se détendre ! Et tous les moyens sont bons. À commencer par écouter ou pratiquer de la musique. Une activité tellement bénéfique pour le mental, que l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a publié en 2019 un rapport reprenant 900 publications scientifiques avérant ses effets positifs — comme ceux de l'art en général — sur l'amélioration de la santé et du bien-être : réduction de l'anxiété et de la douleur, baisse de la tension artérielle, diminution de certains effets secondaires dus aux traitements anticancéreux. « *Faire entrer l'art dans sa vie par le biais d'activités telles que la danse ou le chant donne une clé supplémentaire pour améliorer sa santé physique et mentale* », souligne Piroska Östlin, directrice régionale par intérim de l'OMS pour l'Europe. Tout comme la fréquentation de musées et de

ÉMILE LOREAUX/ HANS LUCAS POUR SCIENCES ET AVENIR- LA RECHERCHE

salles de concerts, hélas ! toujours fermés à l'heure où nous écrivons ces lignes. Toutes les musiques ne se valent pas cependant : selon une étude du laboratoire britannique Mindlab, le morceau *Weightless* (« apesanteur ») du groupe Marconi Union, composé de rythmes reproduisant le rythme cardiaque (60 battements par minute) serait le plus relaxant (1). Toutes ces activités de détente mettent en jeu un balai de neuromédiateurs notamment le GABA (acide gamma-aminobutyrique), inhibiteur de la transmission nerveuse, qui fait baisser le rythme cardiaque, l'hypertension et les niveaux de cortisol, trois marqueurs du stress. La nature a aussi de grandes vertus déstressantes. En 2019, l'université du Michigan (États-Unis) a montré, chez 36 citadins, qu'une « pause nature » quotidienne de vingt minutes réduit significativement (21,3 %/heure) le taux de cortisol (2).

Autre méthode qui a fait ses preuves : la méditation. En 2005, Richard Davidson, de l'université du Wisconsin (États-Unis), a montré qu'elle favorise une activité du cortex préfrontal gauche, impliqué dans les émotions positives (*voir* S. et A. *n° 875, décembre 2019*). Plus récemment, l'observation du cerveau de Matthieu Ricard, moine bouddhiste ayant plus de 30 000 heures de méditation à son actif, a révélé qu'il présentait un épaississement de la matière grise dans les zones cérébrales impliquées dans l'attention, la régulation et la perception des émotions et la mémoire, ainsi qu'une connectivité plus élevée entre ces régions. En 2018, Richard Davidson a aussi établi que devant des images émotionnellement fortes, l'amygdale cérébrale, une structure cérébrale impliquée dans la peur, réagit moins chez les méditants... Conclusion : méditer en pleine nature, en écoutant de la musique douce, c'est la combinaison gagnante antistress ! **E. S.**

(1) sciav.fr/888Musique
(2) sciav.fr/888Nature

5 Retrouver le sommeil

Du jamais vu. La fréquence des troubles du sommeil est passée de 36 % à 50 % dans le monde en à peine six mois selon une étude canadienne (1) présentée à l'été 2020 au congrès annuel américain des professionnels du sommeil (Associated Professional Sleep Societies, APSS). Des chiffres confirmés depuis par d'autres travaux internationaux. Conséquence en France : une hausse de la consommation des hypnotiques (somnifères). Lors des deux premières semaines de confinement, leurs ventes en pharmacie ont augmenté de 11,8 %. Entre le début du premier confinement et la première quinzaine de septembre, ce sont 480 000 boîtes supplémentaires qui ont été prescrites selon l'étude Épi-Phare (2).

Dormir est une activité indispensable à l'adaptation et à la survie de l'organisme, permettant au corps et au cerveau de récupérer. Pour cela, mieux vaut ne pas ruminer des idées négatives. « *Or, depuis mars 2020, les émotions négatives générées par les informations anxiogènes ont été multiples* », explique Ellemarije Altena, chercheuse en neurosciences à l'université de Bordeaux. Avec un groupe de scientifiques européens, elle s'est intéressée dès le début de la pandémie à l'impact du confinement sur le sommeil des Français. L'enjeu est d'autant plus important qu'il s'agit aussi par ce biais de réduire le risque de maladies cardio-vasculaires, de cancers, d'obésité ou encore celui de développer une maladie d'Alzheimer, en lien avec la dette chronique de som- ▶

ALEXANDRE CHARLET CHERCHEUR À L'INSTITUT DES NEUROSCIENCES CELLULAIRES ET INTÉGRATIVES (CNRS/UNIVERSITÉ DE STRASBOURG)

« Le contact physique déclenche la production d'ocytocine aux vertus apaisantes »

Le confinement a pour effet de diminuer les interactions entre personnes pourtant essentielles à la production d'une neurohormone, l'ocytocine, favorisant le bien-être.

« L'impératif de distanciation physique nous a brutalement rappelé combien les contacts et en particulier le toucher sont nécessaires au bien-être, et même à la bonne santé mentale. Ce besoin trouve sa source au cœur du cerveau. C'est ce que notre équipe de l'université de Strasbourg a découvert dans une étude publiée dans *Nature Neuroscience* en 2020. Rappelons que le sens du toucher est mis en œuvre dès la naissance par le biais de milliers de récepteurs tactiles présents sur notre peau. Le toucher sensitif (non douloureux) entre deux individus déclenche la production d'ocytocine dans le cerveau, une neurohormone aux nombreuses vertus apaisantes, appelée parfois "l'hormone de l'amour". Pour décrypter ce mécanisme, nous avons étudié l'activité neuronale de duos de rats femelles, séparées ou non par une cloison. Nous avons alors découvert que lorsque les deux rates entrent en relation et peuvent se toucher, il y a production d'ocytocine. Et uniquement à ce moment-là. Elle est assurée par une toute petite population

ANNE-MARIE MOULIN MÉDECIN, AGRÉGÉE DE PHILOSOPHIE, DIRECTRICE DE RECHERCHE CNRS AU LABORATOIRE SPHERE (PARIS)

« Face aux grandes épidémies de l'histoire, la peur engendre les mêmes réactions »

Colère, panique, violence, boucs émissaires… les émotions et les comportements actuels ne sont pas propres à la pandémie de Covid-19.

« Les épidémies se succèdent et les comportements, souvent dus à la peur, se ressemblent. Désordre, panique et folie ne sont pas caractéristiques de la pandémie de Covid-19 : c'est déjà ce que décrivait l'historien grec Thucydide au Ve siècle avant J.-C., observant une population décimée par une épidémie. De même pour la fuite vers les résidences secondaires à l'annonce des confinements : ce réflexe était déjà rapporté par exemple au XIVe siècle dans le *Décaméron* par Boccace avec le départ des riches dames de Florence à la campagne avec leurs amoureux, pendant que le peuple mourait de la peste. C'est ainsi que les plus déshérités, qui ont moins de moyens de s'isoler, sont

d'à peine une trentaine de neurones particuliers, dits parvocellulaires. Ce circuit neuronal activé par l'interaction sociale procure, par l'intermédiaire de l'ocytocine, un bien-être, une analgésie et motive aussi de nouvelles interactions sociales. Si on inhibe ces neurones par une manipulation génétique, les interactions sociales cessent. Le même mécanisme existe probablement chez l'humain car ces neurones ont été observés sur des coupes de cerveaux *post mortem*. En cette période de confinement, il est probable que nous produisions moins d'ocytocine avec des conséquences à long terme encore inconnues. » ■

Propos recueillis par E. S.

PASCAL BASTIEN / DIVERGENCE POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

toujours les plus frappés par les épidémies. En revanche, les différentes classes sociales sont animées par des émotions analogues : colère, peur, violence. Notamment quand survient la crainte de manquer, dès que l'on envisage les quarantaines ou les confinements. En 2020, les rayons de pâtes ou de farine furent pris d'assaut. En 2016, lorsque a sévi l'épidémie d'Ebola au Liberia, le confinement a conduit à des émeutes quand les provisions vinrent à manquer chez les habitants. Ce réflexe de stockage nous vient du fin fond des siècles, comme pour se préparer à un siège. Le défaut d'approvisionnement a ainsi marqué l'épidémie de peste dans le sud de la France en 1720, lorsque la quarantaine a paralysé le port de Marseille. C'est la sortie en cachette de ballots de tissus, contaminés par des puces de rats, qui a répandu la maladie ! Plus d'un tiers de la population a ainsi perdu la vie. Enfin, face à la peur d'un ennemi invisible, la population se rabat sur des boucs émissaires, souvent les marginaux, les juifs ou les étrangers. Au XIX^e^ siècle, ce sont même les médecins qui ont été soupçonnés d'empoisonner les sources lors des épidémies de choléra, jusqu'à se faire molester. Les personnes d'origine asiatique furent les boucs émissaires du Covid-19. Même si chaque épidémie a ses caractéristiques propres, ces constantes demeurent. Parmi les leçons à tirer et à méditer : l'urgence d'établir avec la population une relation de confiance et de développer une entraide face à l'adversité. » ■

Propos recueillis par C. G.

meil (3). Exemple avec une étude américaine qui a récemment établi que le sommeil permet au cerveau d'évacuer certains déchets à travers le liquide céphalorachidien, comme les protéines bêta-amyloïdes impliquées dans les pathologies neurodégénératives comme la maladie d'Alzheimer (4).

D'où l'importance des recommandations pratiques émises par le groupe de travail d'Ellemarije Altena publiées dès le 4 avril 2020 (5). « *La qualité du sommeil nocturne dépend essentiellement de celle de nos activités diurnes* », rappelle la neuroscientifique. Qui insiste donc sur des points essentiels : maintenir des journées structurées avec des horaires réguliers de lever et de coucher en raison de l'influence des rythmes circadiens, s'exposer au moins une heure et plus si possible à la lumière du jour ; pratiquer quotidiennement un exercice physique (*lire p. 34*). Il faut également limiter les excitants (café, alcool, drogues) et l'usage des écrans. Notamment en raison de l'action délétère de la caféine sur l'adénosine, messager chimique régulateur du sommeil naturellement présent dans le cerveau ou de celle de la lumière bleue des écrans qui perturbe la synthèse de la mélatonine, l'hormone du sommeil, et retarde l'endormissement. Et ce quel que soit l'âge ! Sans oublier de réserver le lit au sommeil — et au sexe. Enfin, il ne faut surtout pas hésiter à évoquer avec son médecin d'éventuels réveils nocturnes, car des programmes courts (6) de thérapie cognitivo-comportementales (TCC), durant lesquels le patient s'exprime librement sur son mal-être, ont fait la preuve de leur efficacité. **S. R.-M.**

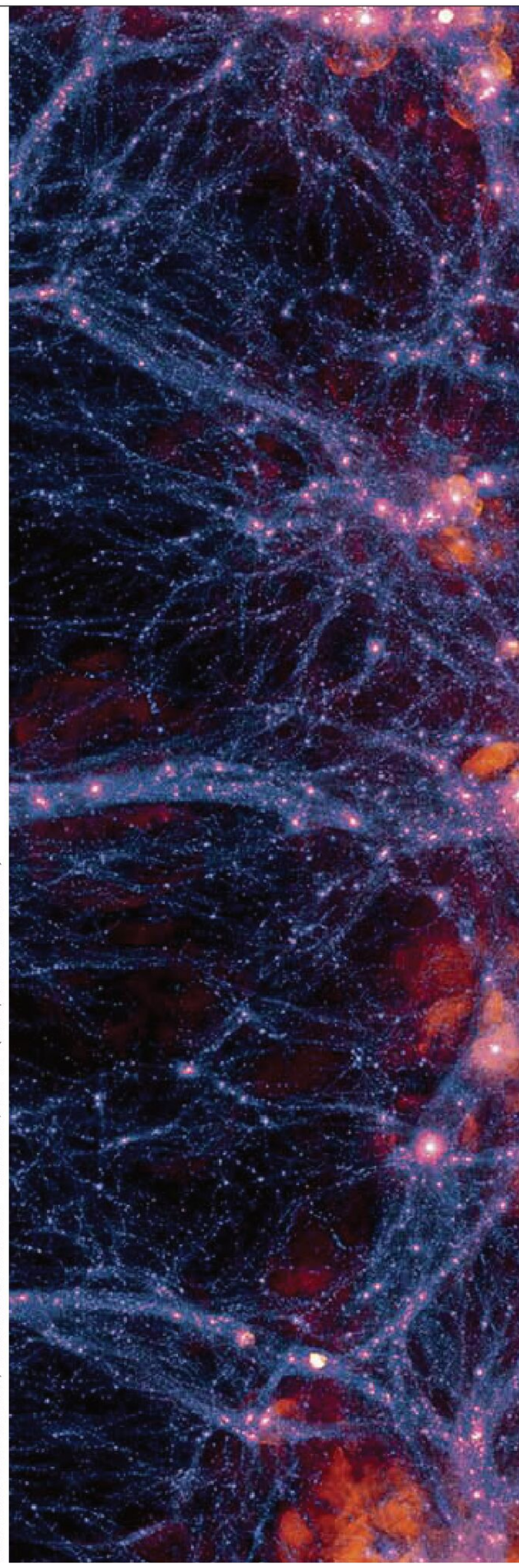
(1) sciav.fr/888Sommeil
(2) sciav.fr/888Epiphare
(3) sciav.fr/888Dettesommeil
(4) sciav.fr/888Alzheimer
(5) sciav.fr/888Recommandations
(6) sciav.fr/888Therapies

FLORENCE LEVILLAIN / SIGNATURES POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

La matière cachée a enfin été débusquée

Une partie de la matière ordinaire demeurait insaisissable depuis des décennies. Une équipe de chercheurs est parvenue à la repérer, sous forme de gaz, au sein des filaments galactiques de notre Univers.

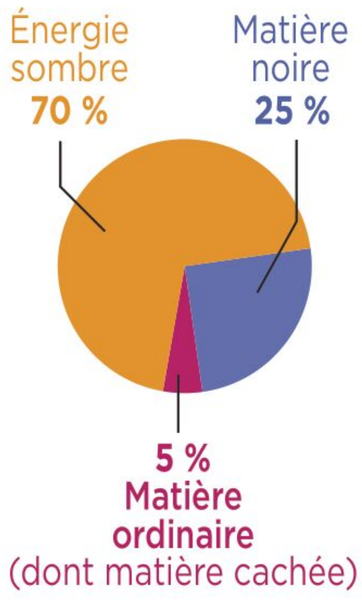
Par Fabrice Nicot @fnicot07



ILLUSTRIS COLLABORATION / « ILLUSTRIS SIMULATION » - TANIMURA, AGHANIM (CNRS/UNIV. PARIS-SACLAY)

LA « MATIÈRE CACHÉE » DE L'UNIVERS... ne l'est plus ! Elle vient d'être débusquée, dissimulée dans des prises de vues du cosmos vieilles de trente ans analysées par une équipe de l'Institut d'astrophysique spatiale (CNRS/université Paris-Saclay). Disons-le d'emblée : la matière cachée n'a rien à voir avec la fameuse « matière noire », qui compose environ un quart de l'Univers et dont les chercheurs ignorent toujours la nature. Elle fait partie de la matière dite ordinaire, composée de neutrons et de protons, la base de tous les atomes. « *Elle existe essentiellement sous deux formes*, détaille l'astrophysicienne Nabila Aghanim, qui a participé à l'étude publiée en novembre dans la revue *Astronomy & Astrophysics*. *Une forme "condensée" : les étoiles, les trous noirs, les planètes... Et une forme "diluée" : du gaz, de l'hydrogène essentiellement. Lorsque l'on observe l'Univers très lointain, lorsqu'il était âgé d'environ 370 000 ans, la matière ordinaire semble au complet. Mais lorsque l'on regarde une tranche située plus près de nous, on s'aperçoit qu'environ 40 % se sont évaporés.* » Et ce sont précisément ces 40 % qui jouaient à cache-cache avec les chercheurs depuis plusieurs décennies que l'équipe française vient enfin de mettre au jour.

Composition de l'Univers

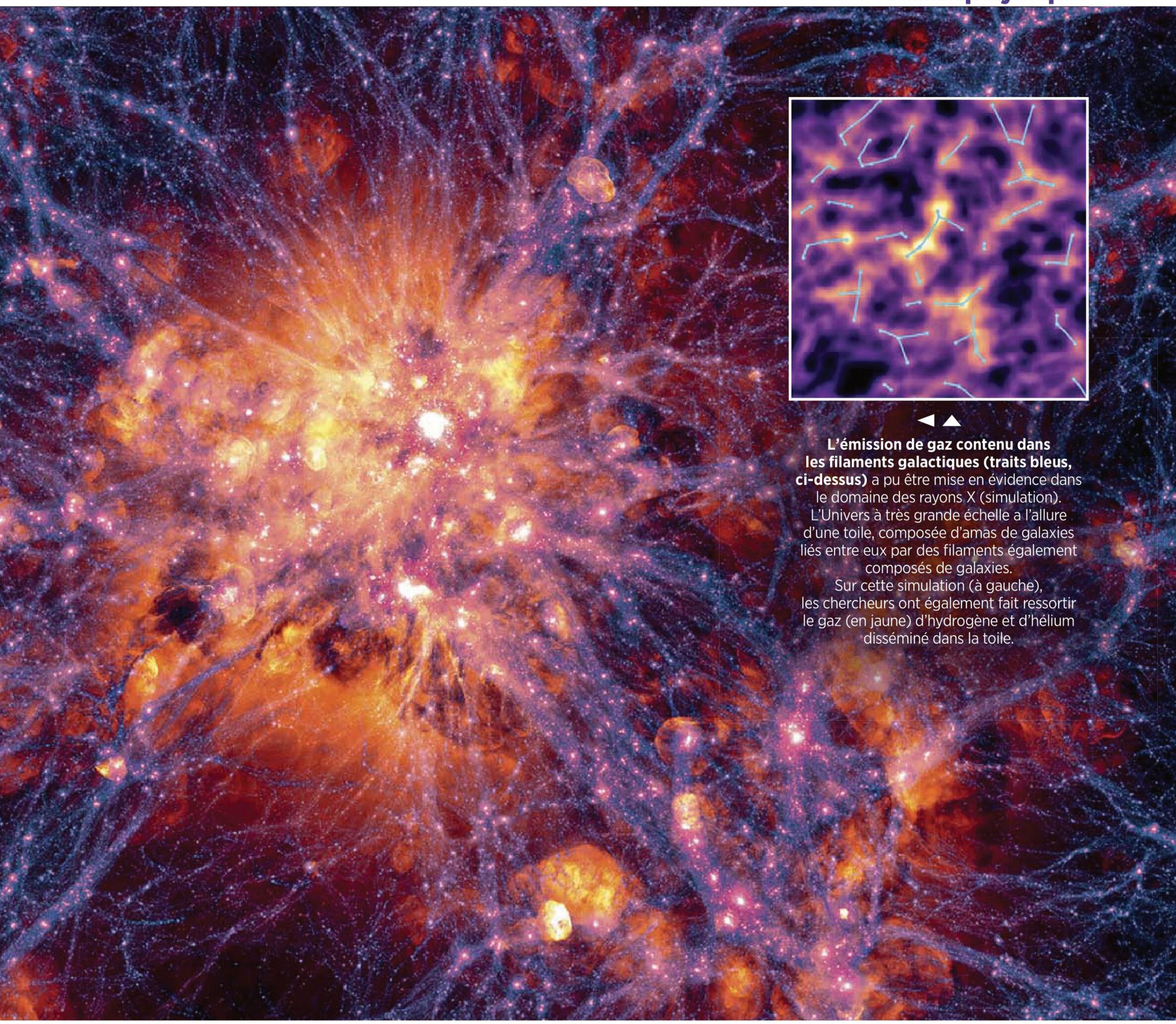


Pour mener leur enquête, les scientifiques disposaient d'un indice : chercher plutôt du côté de la forme diluée. L'explication se trouve en effet dans la structure même de notre Univers, sur des échelles gigantesques, là où la Voie lactée n'est plus qu'un point perdu parmi des milliards d'autres. Depuis déjà deux décennies environ, les cosmologistes connaissent l'allure générale du cosmos grâce à des simulations

HIDEKI TANIMURA

« Nous avons eu recours à des algorithmes de reconnaissance de forme, à de la statistique... »

Hideki Tanimura, membre de l'équipe de l'Institut d'astrophysique spatiale (CNRS/université Paris-Saclay)



L'émission de gaz contenu dans les filaments galactiques (traits bleus, ci-dessus) a pu être mise en évidence dans le domaine des rayons X (simulation). L'Univers à très grande échelle a l'allure d'une toile, composée d'amas de galaxies liés entre eux par des filaments également composés de galaxies. Sur cette simulation (à gauche), les chercheurs ont également fait ressortir le gaz (en jaune) d'hydrogène et d'hélium disséminé dans la toile.

informatiques. Celles-ci reproduisent son évolution, de sa naissance à aujourd'hui, à partir de la composition en matière et en énergie de l'Univers primordial *(lire l'encadré p. 40)*, de son taux d'expansion et de quelques autres paramètres. Résultat : le saisissant spectacle d'une « toile cosmique » où des amas de milliers de galaxies constituent des nœuds reliés entre eux par des filaments, eux-mêmes tissés de galaxies. Ces filaments peuvent atteindre 300 millions d'années-lumière, des dimensions que l'on peine à se représenter, en comparaison du diamètre déjà gigantesque de notre galaxie : 100 000 années-lumière.

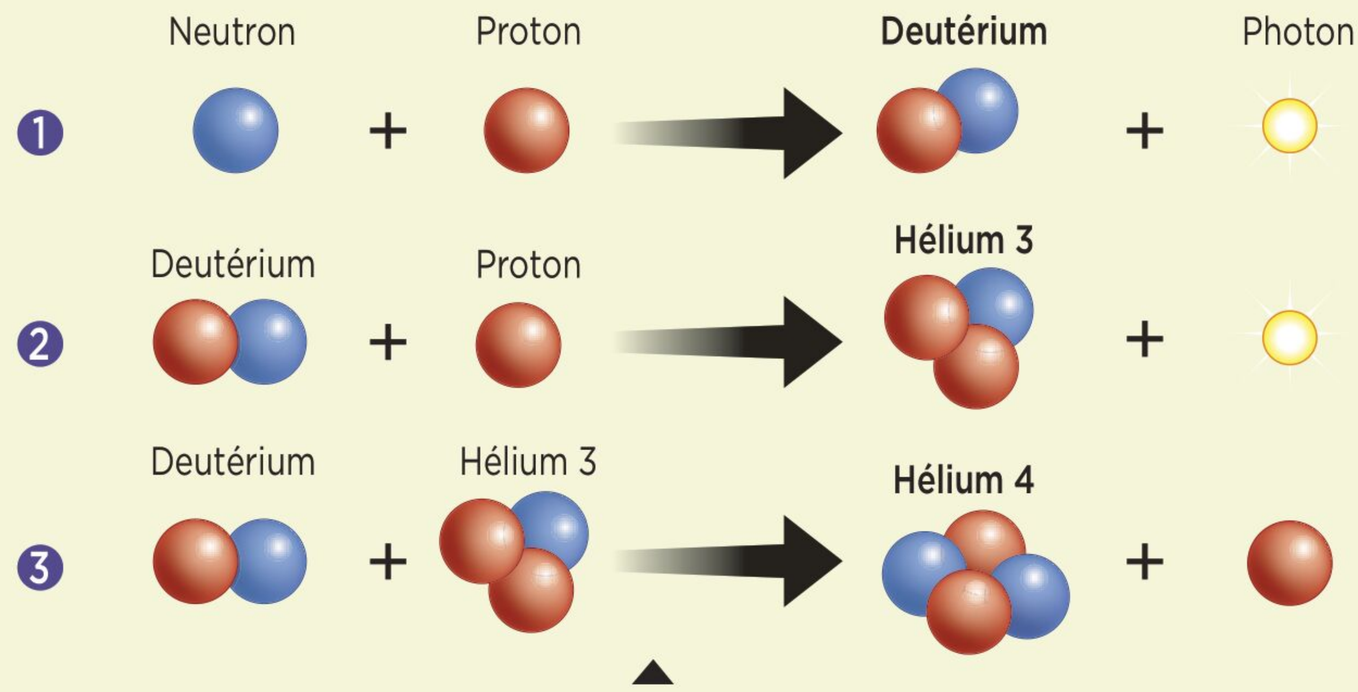
Mais ces simulations, qui donnent la « géographie » de l'Univers, renseignent aussi sur son « peuplement », en quelque sorte. Elles indiquent qu'au fil du temps, le gaz d'hydrogène et d'hélium qui n'a pas fini dans les amas s'est concentré dans les filaments galactiques. C'est donc là que les chercheurs ont décidé de traquer la matière cachée. Problème : ce gaz ne se laisse pas voir facilement ! Certes, sa température (entre 100 000 et 10 millions de degrés) devrait en théorie le faire briller dans le domaine des rayons X, mais comme il est très dilué, les chercheurs ont longtemps douté que cette émission ait vraiment eu lieu… Jusqu'à un coup de théâtre,

ÉTAPES

Comment s'est formée la matière cachée ?

Le gaz d'hydrogène et d'hélium formant la matière « cachée » est presque aussi vieux que l'Univers. L'hélium a commencé à se former environ trois minutes après le Big Bang. L'Univers avait alors l'allure d'une « soupe de particules » ultrachaude composée de 12 % de neutrons et 88 % de protons. Ce déséquilibre tient en partie au fait que le neutron est instable : au bout de 880 secondes en moyenne, il se transforme en proton.
« *Pour le stabiliser, il faut l'assembler avec un proton,* décrit Cyril Pitrou, physicien à l'Institut d'astrophysique de Paris. *Cela se produit trois minutes après le Big Bang, lorsque la température de l'Univers passe sous le milliard de degrés. Un proton réagit avec un neutron pour former un noyau de deutérium. Puis d'autres types de réactions s'enchaînent jusqu'à ce que presque tous les neutrons finissent au sein de noyaux d'hélium 4* [isotope de l'hélium]. »
C'est la nucléosynthèse primordiale, à distinguer de la « stellaire » qui se déroule bien plus tard, au cœur des étoiles. Cette étape ne dure que deux minutes à l'issue desquelles l'Univers se trouve composé de noyaux d'hélium 4 (24 %) et des protons (76 %), qui sont aussi les noyaux des atomes d'hydrogène, et enfin une fraction de deutérium (isotope de l'hydrogène). L'étape suivante se produit 370 000 ans plus tard, lorsque l'Univers n'est plus qu'à 3000 °C. Les électrons, jusqu'ici libres, vont se lier aux noyaux pour former les atomes. Leur capture libère les photons qui ne pouvaient pas voyager librement. Ainsi apparaît la première lumière de l'Univers, ce que l'on appelle le fond diffus cosmologique. Son étude approfondie, notamment grâce aux observations du satellite Planck, a permis de mesurer précisément la proportion de matière primordiale présente à ce moment-là. Et de comparer avec les prévisions théoriques, fondées sur l'étude des réactions entre noyaux. Ce qui peut révéler quelques surprises, comme vient de le pointer Cyril Pitrou dans une étude publiée le 23 novembre 2020 sur le site Arxiv. « *Les dernières mesures précises des paramètres de l'une des trois réactions fondamentales de la nucléosynthèse primordiale aboutissent à une quantité de matière ordinaire un peu moins importante que celle observée dans le fond diffus cosmologique. Les mêmes mesures devront être faites sur les deux autres réactions. Mais si le désaccord persistait, il faudrait trouver l'origine de ce déficit de matière ordinaire.* »

Les trois réactions principales de la nucléosynthèse primordiale



Les premiers atomes de l'Univers se sont formés à partir des protons et des neutrons qui peuplaient l'Univers juste après le Big Bang. Lorsque la température est passée sous le milliard de degrés, protons et neutrons ont fusionné pour former du deutérium (réaction 1) et des photons, des particules de pure énergie. Une cascade de réactions a ensuite eu lieu à partir du deutérium. Les principales sont représentées ici. À l'issue de cette nucléosynthèse primordiale, l'Univers se compose essentiellement d'hélium 4 (^{4}He) et de protons.

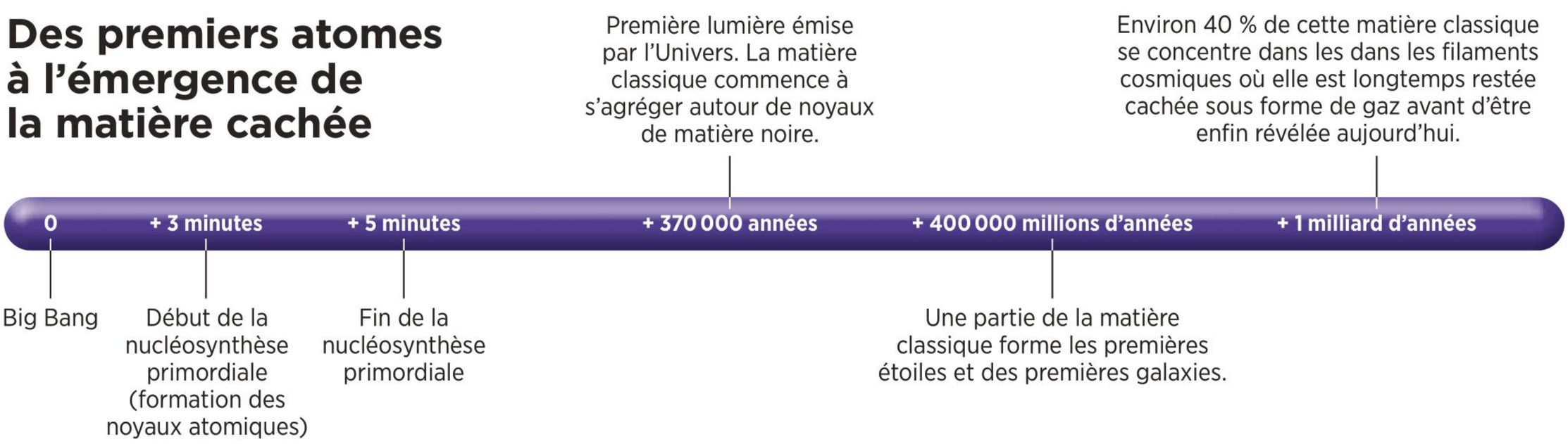
BRUNO BOURGEOIS

en 2018. Une première observation est alors rapportée par le physicien italien Fabrizio Nicastro et son équipe de l'Institut national d'astrophysique, à Rome. Elle a lieu au sein d'un filament galactique éclairé par un quasar, une source de lumière très intense placée derrière lui. La lumière est en partie absorbée par le contenu du filament. En observant les longueurs d'onde prélevées, l'équipe italienne déduit la présence du gaz d'hydrogène. Une belle observation… mais indirecte, et dans un seul filament : l'équipe n'a pas vu d'émission X à proprement parler.

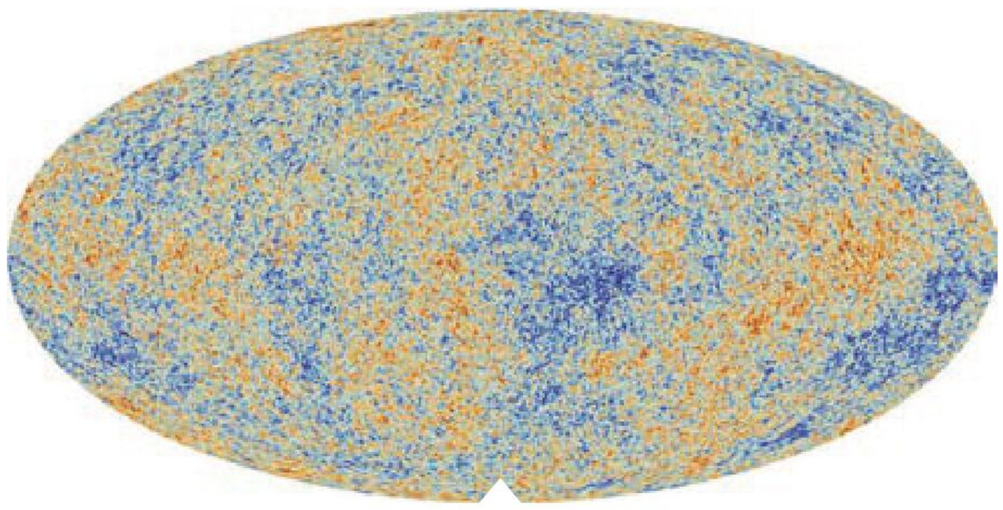
Des millions de prises de vue compilées

« *Notre objectif était donc d'observer le gaz directement, et dans un grand nombre de filaments,* reprend Nabila Aghanim. *Il a d'abord fallu les localiser, afin de savoir où chercher. Pour cela, nous avons utilisé les données du Sloan Digital Sky Survey, le plus précis des relevés d'objets célestes* [qui vient d'être mis à jour, *lire* S. et A. *n° 886, décembre 2020, p. 40].* » Une fois les filaments localisés (environ 25 000), « *nous avons réalisé une première mesure indirecte du gaz en utilisant ce que nous appelons le fond diffus cosmologique* », renchérit l'astrophysicien Hideki Tanimura, membre de l'équipe de l'Institut d'astrophysique spatiale (CNRS/université Paris-Saclay). Constitué par la plus ancienne lumière émise — soit 370 000 ans après le Big Bang —, le fond diffus cosmologique tapisse en quelque sorte le fond de l'Univers. « *Tout ce que l'on peut voir dans l'espace se trouve nécessairement devant, y compris le gaz des filaments* », poursuit Hideki Tanimura. En 2019, l'équipe parvient ainsi à saisir « l'ombre » formée par ce gaz sur le fond diffus, ce que l'on appelle l'effet Sunyaev-Zel'dovich. Un premier résultat très encourageant ! Ne restait plus alors qu'à passer de l'ombre… à la

Des premiers atomes à l'émergence de la matière cachée



lumière X. Pour cela, l'équipe a fait preuve d'ingéniosité. « *Nous ne savions pas si l'émission était perceptible par les télescopes à rayons X et nous ne pouvions pas recourir à de nouvelles observations, trop "chronophages" : L'équipe de Fabrizio Nicastro a ainsi utilisé environ dix-huit jours de temps de télescope pour finalement ne trouver qu'un seul filament à exploiter*, se souvient Nabila Aghanim. *Alors nous avons eu l'idée de chercher cette émission en compilant des milliers de prises de vue du télescope allemand ROSAT* [désorbité en 2011] *correspondant aux régions de l'Univers où l'on trouve des filaments. Et nous avons pu ainsi observer plus de 15 000 d'entre eux !* »
L'équipe fait alors feu de tout bois pour « empiler » les images issues d'une même région. Le principe de la mesure est simple : l'émission étant très faible, peu de photons sont produits. De plus, ils sont noyés dans le bruit parasite ambiant, un peu comme celui brouillant une émission radio. Mais en additionnant les images, les chercheurs sont parvenus à cumuler les photons X, à renforcer le signal mais aussi à diminuer le bruit. En effet, il est par nature aléatoire. En empilant ce bruit, on obtient une valeur moyenne se rapprochant de 0. « *C'est un travail considérable sur les données. Pour trouver et analyser les filaments, nous avons eu recours à des algorithmes de reconnaissance de formes, à de la statistique, etc. Cela afin de retirer toutes les sources parasites de rayons X, comme les trous noirs supermassifs au cœur des galaxies...* », précise Hideki Tanimura.



Le fond diffus cosmologique représente la première lumière émise dans l'Univers, 370 000 ans après le Big Bang. On peut y « lire » la composition de l'Univers à cette époque.

ESA/PLANCK COLLABORATION

Reste encore à recenser tous les réservoirs de gaz

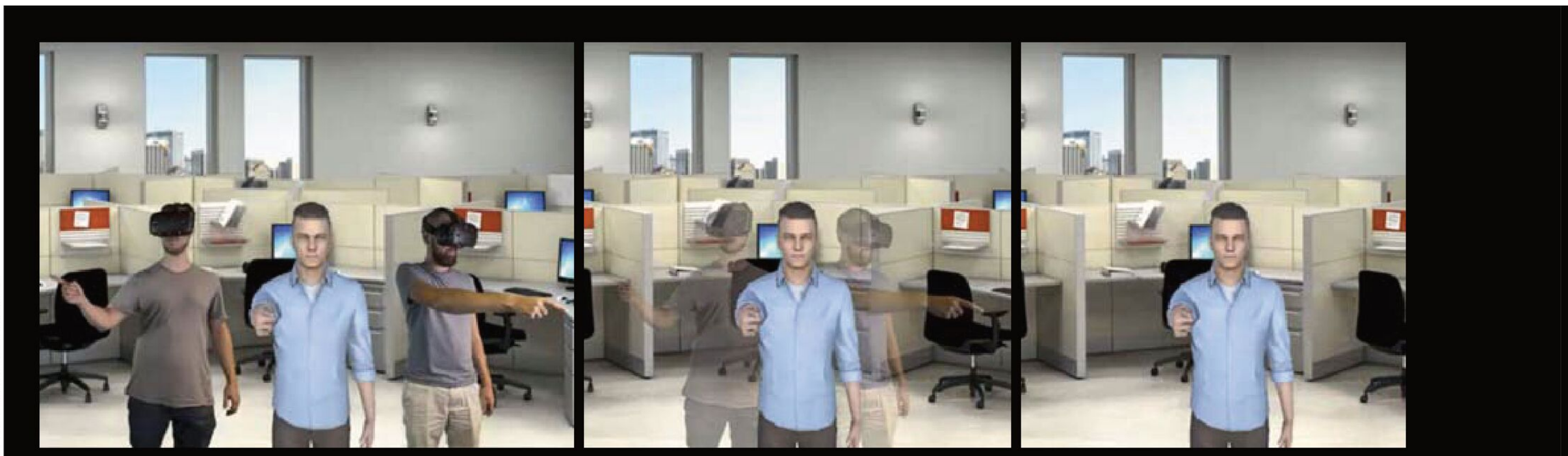
Et c'est ainsi que la faible lueur du gaz a fini par briller sur ces images, sur une tranche d'Univers située entre 2,6 et 7,1 milliards d'années-lumière de la Terre ! Peut-on dire pour autant que le mystère de la matière cachée est éclairci ? Pas tout à fait. Car il reste à quantifier ce gaz. « *Pour cela, il faudra observer une portion d'Univers plus grande*, conclut Nabila Aghanim. *Nous devrons aussi diminuer encore le bruit parasite afin de mieux "voir" ce gaz dont nous ignorons précisément la densité et la température. Sans compter que notre étude a porté uniquement sur les filaments galactiques alors que du gaz a également été observé, à des échelles plus petites, dans les "ponts de matière" qui relient les amas de galaxies. Il faut donc recenser tous ces réservoirs.* » Si la matière cachée a été débusquée, elle attend donc encore d'être comptée... ■

HERVÉ DOLE Professeur à l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay (Essonne) et vice-président de l'université Paris-Saclay

« Ce résultat valide les modèles d'évolution de l'Univers »

HERVÉ DOLE

« La présence de la matière ordinaire cachée dans les filaments était attendue : les simulations l'avaient prévue, et des observations indirectes avaient déjà eu lieu, mais de manière ponctuelle. Or en cosmologie, il est difficile de passer de quelques cas, parfois très particuliers ou bien découverts par hasard, à une généralité. L'équipe de Nabila Aghanim y est parvenue en utilisant une méthode bien connue, à la fois simple et très puissante : l'empilement d'images, que j'avais moi-même utilisé pour mesurer le rayonnement infrarouge des galaxies. Ils ont pris en compte un très grand nombre de données ce qui a conduit à ce travail très "propre", avec un signal qui ressort nettement. On franchit incontestablement une étape. Et c'est un soulagement — ou un regret c'est selon — car cela valide les modèles d'évolution de l'Univers, mais aussi les déductions quant à sa composition basées sur le fond diffus cosmologique. »



SCIENTIFIC REPORTS 8, ARTICLE 2692, 2018

L'expérience d'Inria Rennes consiste à faire incarner et contrôler simultanément un même avatar (en bleu) par deux personnes. Une situation étrange mais qui apparaît bien vécue par les participants.

Étudier les comportements par l'incarnation virtuelle

La démocratisation des visiocasques a donné un coup d'accélérateur aux recherches sur l'incarnation d'avatars en réalité virtuelle. Des projets poussés, alliant technologie et psychologie, étudient les réactions de participants à des situations parfois troublantes.

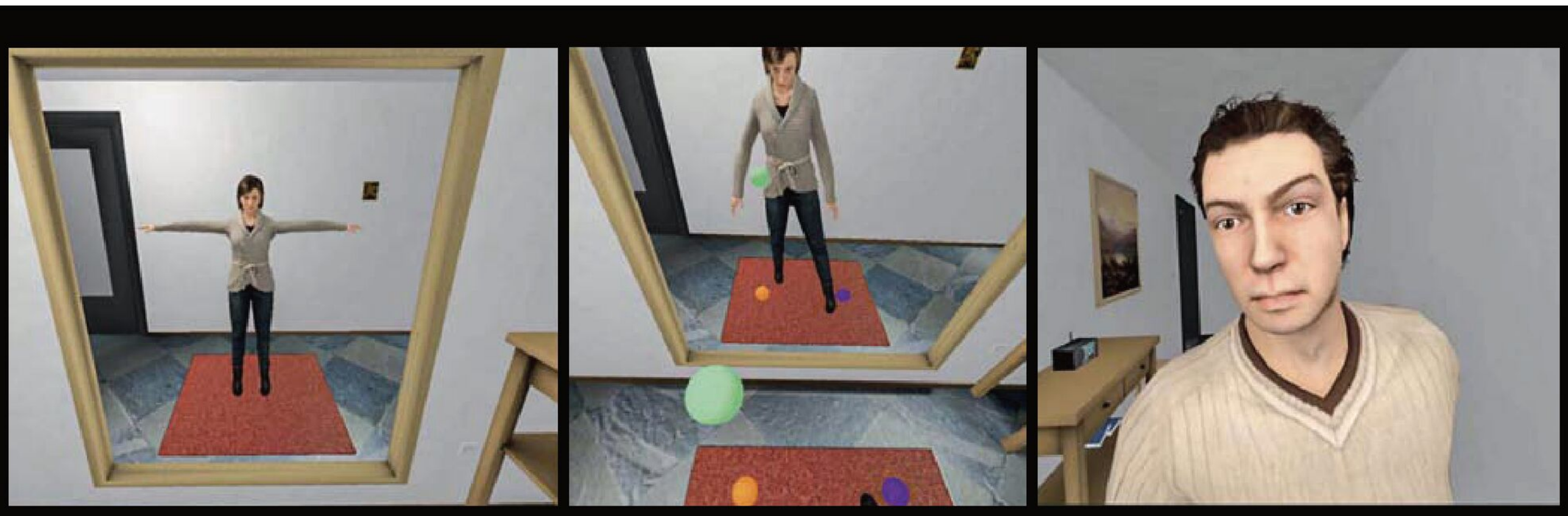
LES DEUX PERSONNES SE FONT FACE mais ne se voient pas physiquement. Chacune porte un casque de réalité virtuelle HTC Vive pour visualiser le même environnement immersif. Toutes deux doivent réaliser les mêmes tâches à l'aide d'une manette de contrôle : allumer des bougies, viser des sphères en suspension ou suivre une trajectoire rectiligne du bout de la manette. Cette situation, *a priori* banale en réalité virtuelle, est en fait une expérience inédite. Car les deux volontaires incarnent et contrôlent simultanément... le même avatar. Ce qui pose d'importants problèmes de coordination. Au point que ce projet de recherche, présenté début octobre 2020 par deux étudiantes, Rebecca Fribourg, en thèse à Inria Rennes, et Nami Ogawa, de l'université de Tokyo (Japon), est à l'origine d'un terme nouveau : la co-incarnation. L'enjeu ? Étudier les réactions des utilisateurs face à un corps virtuel qu'ils ne contrôlent pas totalement, puisque celui-ci est partagé. De quoi envisager des applications dans le domaine de la formation et de l'apprentissage.

Pour l'expérience, les deux participants utilisent un équipement informatique (logiciel et matériel) strictement identique et ont chacun, au départ, le même potentiel de contrôle sur l'avatar. Dès lors, comment gérer des ordres divergents ? Tout repose sur un système de suivi des mouvements qui collecte les données de positionnement des mains dans l'espace. « *Nous effectuons ensuite une pondération, que les mouvements aillent dans le même sens ou non* », explique Rebecca Fribourg. Si les deux participants avancent la main dans la même direction mais que l'un va plus vite et plus loin, il prend davantage de contrôle sur l'avatar sans que celui-ci soit total : cet avantage est calculé automatiquement à partir de la différence de coordonnées spatiales entre les deux gestes. Ainsi, le premier volontaire peut se retrouver à contrôler à 75 % l'avatar et le

A. LECUYER-INRIA / PHOTO KAKSONEN

« Grâce à la co-incarnation, un instructeur pourrait guider un apprenant »

Arnaud Lecuyer, directeur de recherche à Inria et responsable de l'équipe Hybrid sur l'interaction 3D



Dans cette séquence immersive de l'université de Barcelone (Espagne), le participant incarne une femme (à gauche et au centre) face à un conjoint menaçant (à droite). Elle est utilisée sur des hommes condamnés pour violences conjugales afin qu'ils comprennent la peur qu'ils suscitent.

R. FRIBOURG, NAMI OGAWA ET AL., COLLABORATION INRIA ET UNIVERSITÉ DE TOKYO

second à 25 % ou encore à 50-50 si les deux agissent exactement de la même manière. « *Lorsque les directions sont diamétralement opposées, l'avatar ne peut pas bouger* », poursuit Rebecca Fribourg. Qu'en est-il du ressenti des utilisateurs qui voient leurs gestes réels ainsi minorés ou contrariés dans le virtuel ? À la grande surprise des chercheuses, la situation est plutôt bien vécue, ce qui apparaît prometteur pour de futures applications. « *Un instructeur pourrait ainsi guider un apprenant* », estime Anatole Lecuyer, directeur de recherche à Inria et responsable de l'équipe Hybrid sur l'interaction 3D. Sport, danse, chirurgie, rééducation motrice… les domaines sont nombreux et permettraient au formateur de régler le contrôle pour se l'attribuer dans un premier temps, afin de montrer le bon geste à effectuer avant de laisser la main à l'apprenant.

Une certaine prudence chez les scientifiques

Cette expérience a livré d'autres précieux enseignements sur la façon dont un individu s'incarne dans un avatar. Un consensus scientifique définit en effet l'incarnation virtuelle selon trois dimensions : l'agentivité, correspondant au contrôle d'un corps virtuel ; la localisation de soi, qui est le fait de sentir que l'on est à l'intérieur de ce corps ; et l'appropriation, celui de ressentir ce corps comme étant le sien. « *La démocratisation des visiocasques facilite les recherches dans ce domaine,* estime Anatole Lecuyer. *Il en résulte une série de questionnements scientifiques en matière de réalisme, de perception, d'interaction et de psychologie.* » Au point que la communauté scientifique prône une certaine prudence *(lire l'encadré ci-dessous)*. Il existe en effet une grande différence entre la réalité virtuelle et une « simple » application disponible sur écran d'ordinateur comme les jeux vidéo : les participants ne pilotent plus un personnage, ils sont ce personnage. Ainsi, comme ▸

ÉTHIQUE ET SANTÉ

Des risques pour le grand public ?

Incarner un avatar est-il dangereux à moyen ou long terme ? C'est justement parce qu'on l'ignore que des chercheurs montent au créneau. Car avec des équipements tels les casques Oculus, HTC Vive, Playstation VR ou Google Cardboard — et bientôt les lunettes de Panasonic — la réalité virtuelle est sortie des laboratoires pour toucher le grand public. Quatorze personnalités issues du monde académique et industriel ont donc publié un texte appelant à la vigilance, le 3 mars 2020, dans *Frontiers in Virtual Reality*.

L'expérience immersive soulève des questions éthiques encore peu abordées, estiment-ils. « *Dans les films, certains personnages en traitent mal d'autres mais en VR, c'est nous qui sommes amenés à le faire ou à le subir.* » Jusqu'où aller, avec quels impacts sur les émotions, les comportements, la perception du monde ? Lorsque la réalité virtuelle sera utilisée à des fins douteuses (insulter ou attaquer quelqu'un, être raciste, etc.), il sera peut-être trop tard pour s'en inquiéter. En France, l'Anses prépare un rapport sur le même sujet pour 2021. Il couvrira de nombreux domaines : vision en relief, cinétose (vertige), effets des LED, addictions aux écrans, etc. C'est pourquoi le groupe de travail rassemble des informaticiens, des psychologues, des ergonomes mais aussi des ophtalmologues et des ORL. « *L'agence de sécurité sanitaire s'est autosaisie. Elle va évaluer un niveau de preuve de risque mais quand elle ne saura pas l'estimer, elle le dira* », explique Guillaume Moreau, chercheur en informatique à Centrale Nantes qui y participe.

JEAN-CLAUDE MOSCHETTI / HEUDIASYC / CNRS PHOTOTHÈQUE

Dans cette salle immersive de formation pour une société de fonderie en aluminium, les participants font un détour pour éviter les objets alors qu'ils savent évidemment que c'est un environnement virtuel (laboratoire Heudiasyc CNRS-Université de technologie de Compiègne).

le montrent Rebecca Fribourg et Nami Ogawa, ils surestiment souvent leur niveau de contrôle sur l'avatar. Une surestimation qui serait liée, chez certaines personnes, à leur conviction (pas forcément pertinente) de maîtriser intégralement leurs actions et leurs choix. Incarner un avatar reposerait donc en partie sur la perception que les utilisateurs ont d'eux-mêmes.

Autre exemple avec un projet de recherche du laboratoire Heudiasyc CNRS-université de Technologie de Compiègne qui a aidé à la création d'un environnement de formation pour une société de fonderie en aluminium. « *Les participants ont beau savoir que tout l'environnement dans lequel ils évoluent est virtuel, ils font naturellement un détour pour ne pas heurter des équipements présents dans le décor !* », note Indira Thouvenin, enseignante-chercheuse du laboratoire. S'y ajoute la question du regard social. « *L'incarnation dans un avatar suppose de voir, d'entendre et de ressentir mais aussi d'être vu par les autres dans l'environnement virtuel*, continue la chercheuse. *La question pour chacun est alors de savoir si l'on se sent incarné comme on imagine l'être car on n'a jamais la vision complète de son corps virtuel.* » Pour cette raison, le spécialiste Mel Slater, du département de psychologie clinique de l'université de Barcelone (Espagne), inclut dans ses expériences des miroirs dans lesquels se reflète l'avatar du participant. « *Cela ajoute aussi à l'intégration dite multisensorielle : les gens bougent, se sentent bouger et le constatent en regardant leur corps virtuel dans le miroir.* » Le chercheur est à l'origine de plusieurs dispositifs destinés à étudier les effets d'une incarnation virtuelle sur les comportements. L'un d'eux place un adulte dans le corps virtuel d'un enfant de 4 ans pour qu'il découvre le monde de ce point de vue ; ou une mère dans celui d'un enfant faisant face à une mère virtuelle ayant une attitude positive ou négative.

Le patient tient deux rôles : le sien et celui de Freud

L'ambition est de travailler à l'amélioration de comportements en provoquant soit un sentiment d'empathie soit un stress, voire une sensation de danger chez les participants. Avec la neuroscientifique Mavi Sanchez-Vives, Mel Slater a ainsi mis au point une expérience choc où des hommes condamnés pour violences conjugales incarnent une femme menacée par un mari violent. Le projet est mené avec les autorités judiciaires de Catalogne (Espagne), qui l'utilisent dans le cadre de ses programmes de réinsertion.

Une autre immersion, troublante, s'inspire de la technique dite de la chaise vide en psychothérapie. Dans une séance de consultation virtuelle, un patient tient deux rôles en alternance : le sien, exprimant ses problèmes, et celui du thérapeute, en l'occurrence... Sigmund Freud ! Le patient se parle donc à lui-même selon deux points de vue différents. « *Ce travail est maintenant en voie d'être utilisé pour traiter de problèmes personnels dans un certain nombre de situations* », explique Mel Slater. Il a créé la société Virtual Bodyworks pour assister les professionnels désireux d'utiliser ses dispositifs de réalité virtuelle avec leurs patients. Quand le virtuel aide à faire face au monde réel... Freud aurait sans doute apprécié. ■

Arnaud Devillard @A_Devilla

LE + NUMÉRIQUE

- L'expérience de co-incarnation d'Inria Rennes : **sciav.fr/888Inria**
- Point de vue et avertissement de trois chercheurs français sur l'incarnation virtuelle : **sciav.fr/888CNRS**
- La thérapie par autoconsultation en réalité virtuelle : **sciav.fr/888therapie**
- Lettre ouverte demandant à veiller à l'éthique en réalité virtuelle : **sciav.fr/888ethique**

UTC

« L'incarnation dans un avatar suppose de voir, d'entendre... mais aussi d'être vu par les autres dans l'environnement virtuel »

Indira Thouvenin, enseignante-chercheuse au laboratoire Heudiasyc CNRS-université de Technologie de Compiègne

Des fragments d'astéroïde vont être analysés en France

Rapportés sur Terre depuis Ryugu par la sonde japonaise Hayabusa2, ils pourraient bouleverser notre connaissance du système solaire.

Une quantité plus importante que prévu

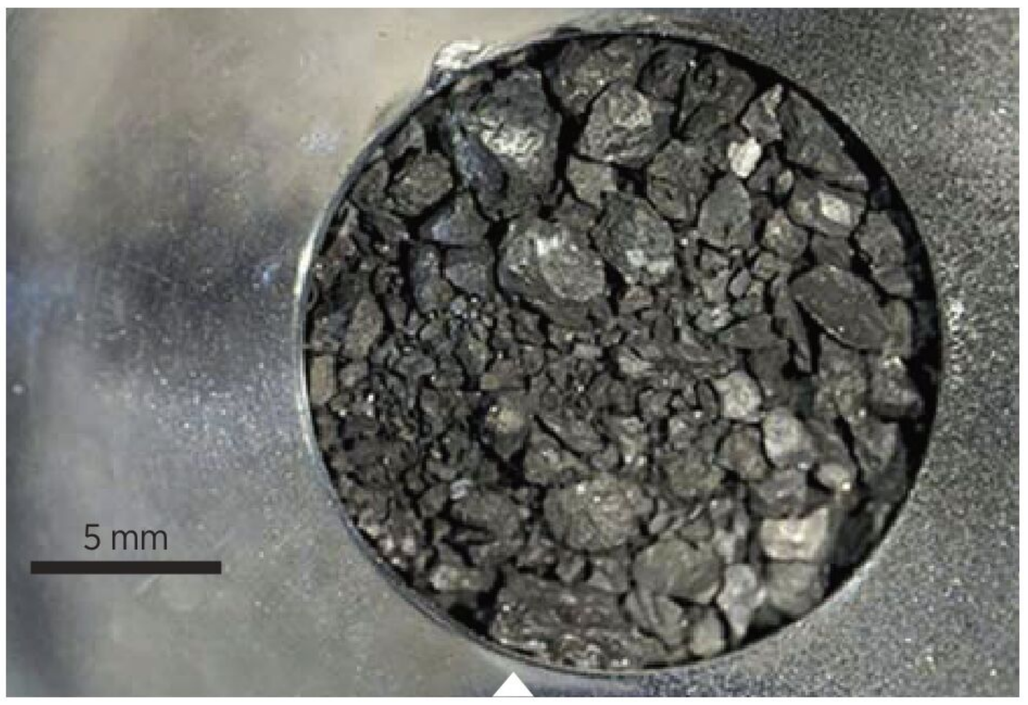
La quantité de grains de tailles diverses et de couleur très foncée, semblable à celle du charbon, dépasse largement les objectifs fixés. Avec 5,4 g, c'est cinquante fois plus qu'escompté (environ 100 milligrammes) !

Une succession réussie

La quantité de matière rapportée par Hayabusa2 excède aussi de très loin la masse des tout premiers échantillons d'astéroïde que la JAXA avait rapportés en 2010 avec la mission pionnière Hayabusa. Un milligramme de matière, pas même visible à l'œil nu, qui n'avait permis que des analyses parcellaires.

Au service des générations futures

40 % des échantillons de Hayabusa2 seront conservés pour les générations à venir qui devraient disposer d'instruments d'analyse plus perfectionnés. 10 % seront également transmis à la Nasa en échange de ceux collectés sur l'astéroïde Bénou en octobre 2020 et qui devraient être acheminés sur Terre en 2023.



JAXA

Les échantillons (ici vus au microscope) ont été emprisonnés dans une capsule relâchée par la sonde pour atterrir dans le désert australien.

À peine plus de cinq grammes de petits cailloux et de poussières... Cela pourrait paraître peu mais la communauté scientifique est en ébullition devant ces fragments de roches extraterrestres (5,4 g précisément !) et attend avec impatience que les analyses débutent. Car c'est un véritable trésor que la sonde japonaise Hayabusa2 a rapporté début décembre sur notre planète. Elle l'a chapardé en 2019 sur Ryugu, astéroïde de 900 mètres de diamètre vagabondant à plus de 300 millions de kilomètres de nous. Or cet astéroïde de type « C », riche en carbone, en composés organiques et minéraux hydratés, est censé contenir les matériaux les plus primitifs du système solaire. Et c'est la première fois que les scientifiques parviennent à mettre la main sur des matériaux de ce type ! Grâce à ce butin, ils espèrent mieux comprendre comment notre planète et les autres corps du système solaire ont pu se former il y a 4,5 milliards d'années. Et aussi découvrir des informations essentielles sur l'origine de l'eau et des composés organiques qui, sur Terre, ont permis à la vie d'émerger.

Conservés au Sagamihara Campus de l'Agence spatiale japonaise (Jaxa), les échantillons y seront d'abord caractérisés et catalogués. Puis, à l'été prochain, des fragments seront distribués à un vaste consortium de chercheurs internationaux sélectionnés par la Jaxa. Près de 200 en tout, dont une vingtaine de Français issus de plusieurs laboratoires. Parmi ces derniers : le Centre de recherches pétrographiques et géochimiques à Nancy, l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble ou encore l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie de Paris. L'attente y paraîtra longue. ■ **Franck Daninos**

@fdaninos

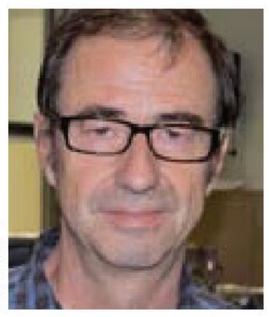
INTERVIEW

BERNARD MARTY

CHERCHEUR AU CENTRE DE RECHERCHES PÉTROGRAPHIQUES ET GÉOCHIMIQUES DE NANCY

« NOUS SOMMES TRÈS EXCITÉS DE RÉALISER CES ANALYSES PIONNIÈRES »

« Notre équipe fait partie des sept laboratoires français qui, à partir de cet été, bénéficieront d'un accès privilégié aux fragments de l'astéroïde Ryugu. Nous devrions même recevoir, dès le mois de mars, une fraction du gaz recueilli dans la capsule de retour d'échantillons. Libéré par l'échauffement des poussières de l'astéroïde lors de la rentrée dans l'atmosphère terrestre, ce gaz pourrait déjà dévoiler de précieuses informations. Nous nous attacherons à analyser les éléments volatils tels que l'hydrogène, le carbone ou l'azote afin d'en retracer l'origine, tandis que d'autres équipes se focaliseront sur la composition minéralogique ou la structure des molécules organiques. C'est de l'exploration pure. Et nous sommes tous très excités de réaliser ces analyses pionnières qui pourraient bouleverser les modèles de formation du système solaire. »



B. MARTY

JEAN-BAPTISTE CAMPS
CHERCHEUR DE L'ÉCOLE NATIONALE DES CHARTES

Les limites de la stylométrie dans l'affaire Grégory

L'enquête sur le meurtre de Grégory Villemin en 1984 a été relancée par le recours à la stylométrie. Une technique ancienne d'analyse des textes dont l'usage explose depuis une vingtaine d'années grâce à l'informatique, comme l'explique l'enseignant-chercheur Jean-Baptiste Camps.

MARCEL MOCHET / AFP

TRENTE-SIX ANS après le meurtre du « petit » Grégory Villemin à Lépanges-sur-Vologne en 1984, de nouvelles auditions ont eu lieu en décembre 2020. Elles font suite à des expertises dites stylométriques pour tenter de démasquer le ou les « corbeaux » auteurs des cinq lettres anonymes reçues entre 1983 et 1985 par la famille de la victime. Une mission confiée en 2017 à la société suisse OrphAnalytics. Jean-Baptiste Camps a lui-même appliqué cette approche statistique aux œuvres de Molière l'an dernier *(voir* S. et A. *n° 876, février 2020)*.

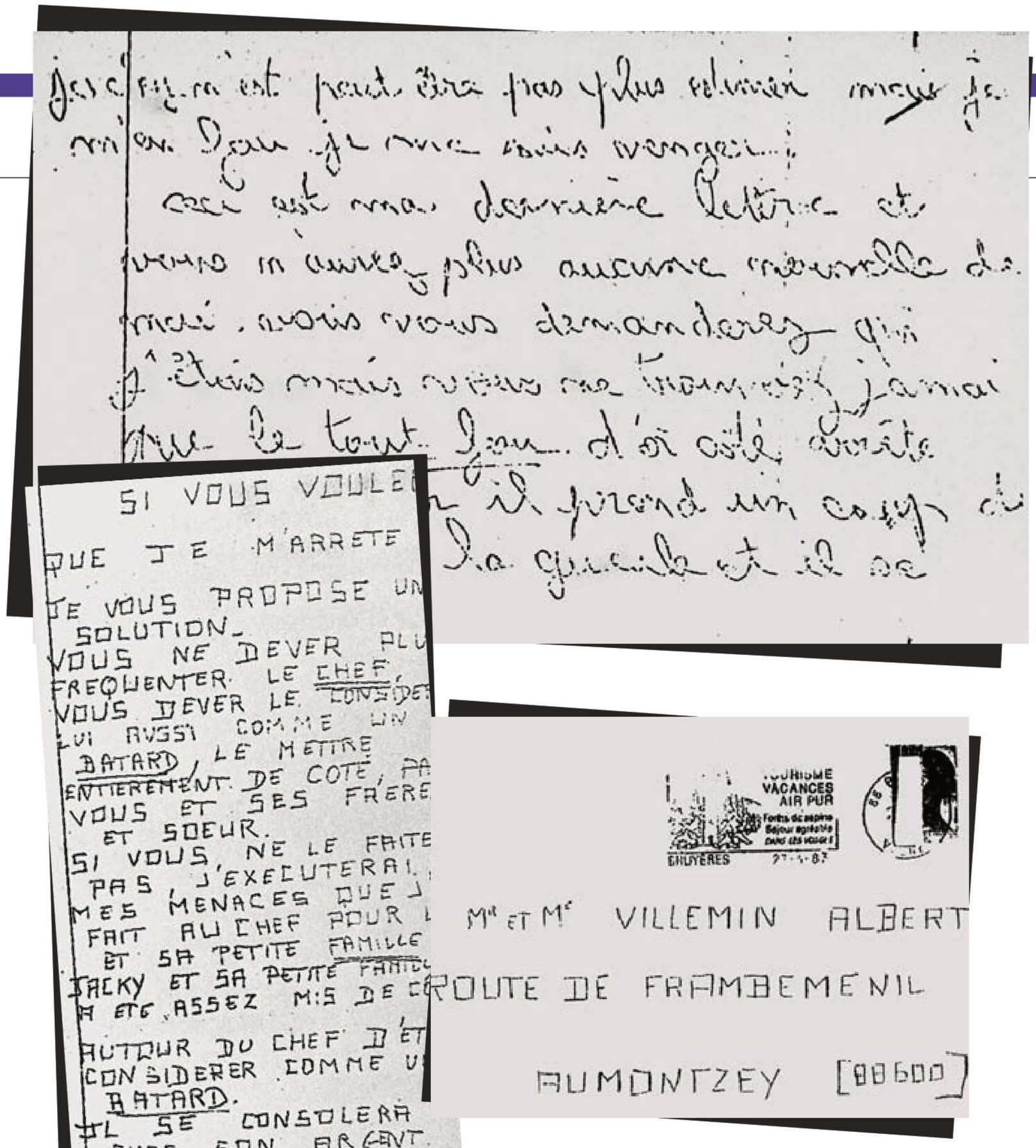
JEAN-BAPTISTE CAMPS

Jean-Baptiste Camps, maître de conférences à l'École nationale des chartes, est responsable pédagogique du master Humanités numériques et recherche à l'université Paris Sciences & Lettres.

La stylométrie a-t-elle déjà été utilisée dans le cadre d'une affaire judiciaire ?
Je n'ai pas connaissance d'une affaire judiciaire y ayant eu recours en France. Pourtant, la méthode est connue dans notre pays : Charles Muller, linguiste à l'université de Strasbourg, a écrit sa thèse sur la statistique du vocabulaire de Corneille dans les années 1960 et il existe tout une école française avec Charles Bernet et Étienne Brunet, entre autres. En revanche, à l'étranger, la stylométrie a déjà été utilisée dans une affaire criminelle pour décrypter l'*Unabomber Manifesto* en 1995 [Texte du poseur de bombes américain Theodore Kaczinski surnommé Unabomber] et tenter de confondre son auteur.

En quoi consiste cette technique ?
Le principe est de s'intéresser à des caractères inconscients d'écriture : le nombre de « mots outils » [pronoms, prépositions, articles, conjonctions de coordination, etc.] dans des textes. Vers 1900, le physicien Thomas Mendenhall a développé, pour la première fois, une machine à compter la longueur des mots, la fréquence des mots de 1, 2, 3 lettres, etc., pour créer ensuite des profils et pouvoir attribuer des œuvres à des auteurs comme Miguel de Cervantès, Alexandre Dumas, William Shakespeare... En 1964, Frederick Mosteller et David Wallace ont été parmi les premiers à utiliser l'informatique pour étudier les *Federalist Papers*. Cette série d'essais constitutionnels importants aux États-Unis (1788) était une collaboration entre James Madison, Alexander Hamilton et John Jay qui avaient signé sous le pseudonyme collectif de Publius. Démêler qui avait écrit quoi a été l'une des grandes missions de la stylométrie. L'informatique et l'intelligence artificielle (IA) ont ensuite apporté des facilités de calcul et autorisé des recherches aux périmètres plus larges, d'où l'explosion de cette technique depuis une vingtaine d'années. La méthode s'est développée avec les calculs de distance, l'apprentissage machine, les réseaux de neurones.

Que sont ces « calculs de distance » ?
Pour simplifier, on considère que la fréquence d'un mot outil comme « le », dans les différents textes étudiés, constitue une coordonnée. La fréquence de « du » sera une autre coordonnée et ainsi de suite. On obtient ainsi cent ou mille coordonnées et les textes peuvent être vus comme des points dans un espace et on calculera alors les distances entre ces points. C'est un genre



AFP

L'analyse a porté sur les écrits anonymes reçus par la famille de la victime entre 1983 et 1985. Ces cinq lettres risquent de former un ensemble trop réduit pour garantir la fiabilité du résultat.

de métaphore dans laquelle on spatialise le texte.

Savez-vous comment a travaillé OrphAnalytics, mandatée par la justice sur « l'affaire Grégory » ?
Si l'on se fie à ses brevets, cette société suisse utilise l'arsenal classique des stylomètres : des calculs sur les mots outils, sur la longueur des mots, la longueur des phrases mesurée en fonction des signes de ponctuation, ou encore des n-grammes de caractères, c'est-à-dire des suites de n caractères. Mais nous ne savons pas si elle s'est servie de l'IA comme l'apprentissage supervisé et les réseaux de neurones.

Dans cette affaire, le corpus réduit des lettres anonymes n'est-il pas un problème ?
Il y a déjà eu des recherches sur des portions de texte relativement courtes. Mais les études montrent qu'en dessous de 5000 à 3000 mots, la fiabilité du résultat décroît beaucoup. Se pose aussi la question des données de comparaison. Avec des approches non supervisées, on regarde simplement de quels textes ceux que l'on analyse sont proches, sans hypothèse préalable. À l'inverse, les méthodes supervisées nécessitent de construire — grâce à l'apprentissage automatique par exemple — des profils correspondant à un certain nombre de candidats déterminés à l'avance. Un programme informatique « apprend » ensuite à reconnaître ces plumes. Puis de nouveaux textes lui sont soumis afin qu'il les attribue ou non à l'un d'entre eux. Les résultats sont ainsi potentiellement plus fiables.

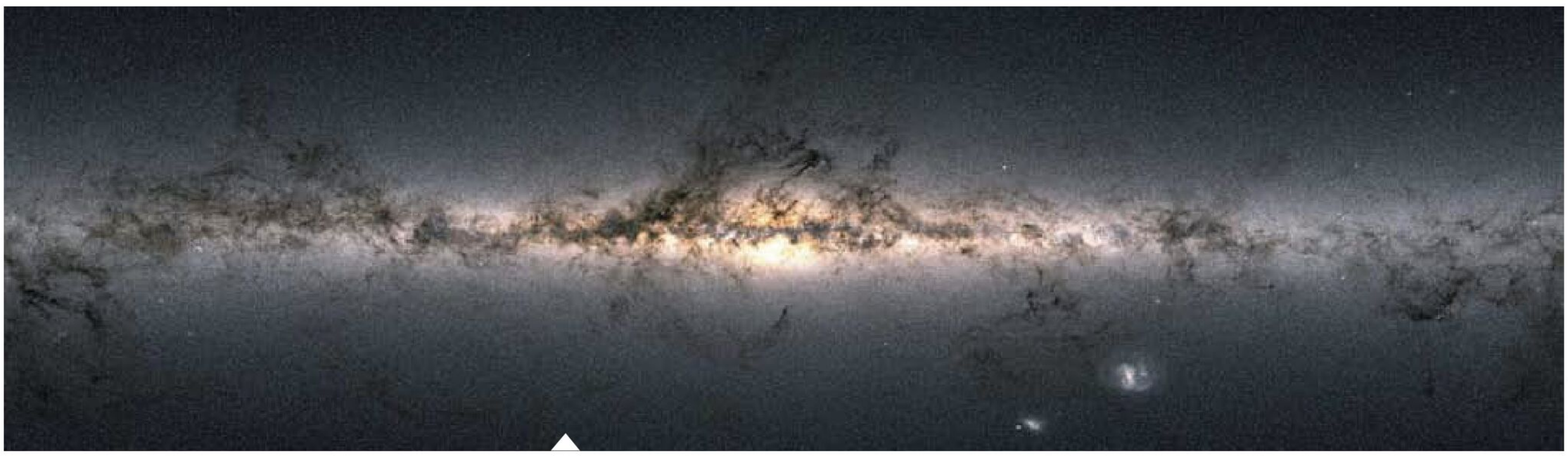
En l'occurrence, à quoi ont été comparés les résultats issus de l'analyse des courriers anonymes ?
Les données n'ont pas été communiquées mais la juge a fourni des textes écrits par des protagonistes de l'affaire, et qui auraient apparemment tantôt été saisis lors des perquisitions, tantôt écrits à la demande de la justice. Mais est-ce la même chose d'écrire une lettre anonyme et une déposition ?

Qu'est-on censé attendre d'une telle analyse dans cette enquête ?
On peut « *sortir* » un nom ou plusieurs. Il est ainsi possible d'affirmer : « *Cette lettre anonyme se trouve à telle distance moyenne des échantillons renvoyant au profil n° 1, à telle distance moyenne des échantillons du profil n° 2, etc.* » Une probabilité plus grande que l'auteur corresponde à tel profil plutôt qu'à tel autre est ainsi établie. Autre possibilité : la présentation d'un résultat sous forme plus supervisée qui reviendrait à dire : « *Notre modèle — dont la réussite dans l'attribution d'échantillons est de 90 % — attribue telle lettre anonyme à tel profil avec tel taux de probabilité et avec tel autre taux à un autre profil.* » La réponse ainsi obtenue n'est ni irréfutable ni incontestable mais elle donne des indications pointant vers une personne plutôt qu'une autre. Éléments qui, évidemment, ne doivent pas être pris isolément mais croisés avec d'autres constats d'expertise légale. ■

Propos recueillis par
Arnaud Devillard @A_Devilla

La Voie lactée comme on ne l'a jamais vue

Une nouvelle analyse des données du télescope spatial Gaia a permis de décrire les étoiles dans le ciel avec deux fois plus de précision.



© ESA/GAIA/DPAC

Sans cible particulière, le télescope, positionné à 1,5 million de kilomètres de la Terre, a déjà recensé presque deux milliards d'étoiles.

UN MILLIARD HUIT CENTS MILLIONS D'ÉTOILES ! Les résultats préliminaires du troisième catalogue du télescope spatial Gaia en recensent cent millions de plus que l'ancienne version, qui remonte à 2018. Dévoilé en décembre 2020 par l'Agence spatiale européenne (ESA), le Gaia Early Data Release 3 (EDR3) offre ainsi « *une astrométrie beaucoup plus fine, puisque les mouvements des étoiles dans le ciel ont été mesurés avec deux fois plus de précision et que le calcul de leur distance a été amélioré de 30 %* », souligne Catherine Turon, astronome à l'observatoire de Paris.

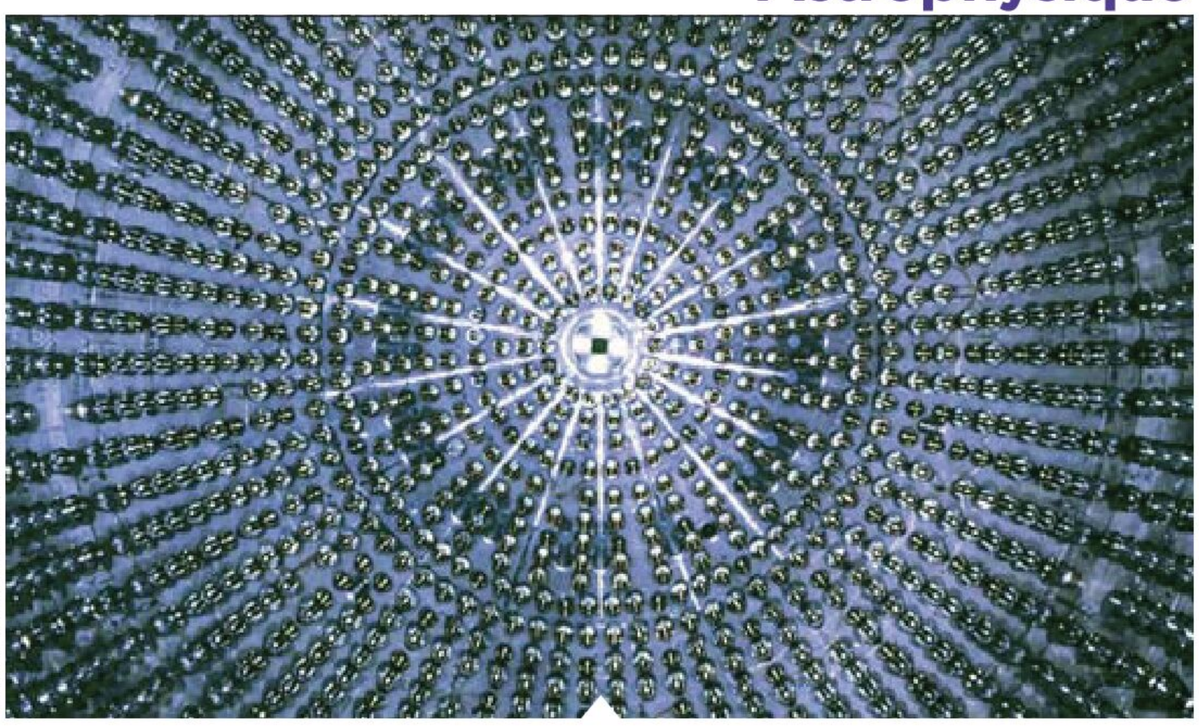
Positionné depuis 2013 à 1,5 million de kilomètres de la Terre, Gaia balaie le ciel. « *Sans cible déterminée à l'avance, il observe les mouvements de ces milliards d'étoiles dont l'interprétation renseigne sur leur formation et leur répartition entre le disque, le bulbe ou le halo galactique,* se réjouit l'astronome. *Et il permet aussi de faire des découvertes inattendues.* » Gaia a ainsi déniché les traces d'une ancienne collision, entre la Voie lactée et une galaxie naine, il y a entre 9 et 11 milliards d'années. Et d'une autre plus récente dont les effets auraient déclenché le processus ayant donné naissance au Soleil, il y a 4,6 milliards d'années.

La trajectoire du système solaire déviée

Au-delà de la Voie lactée, le télescope a visé les deux galaxies satellites du Petit et du Grand Nuage de Magellan. « *Pour la première fois on a précisément observé la rotation du Grand Nuage et mesuré la vitesse du courant d'étoiles entre les deux* », souligne Catherine Turon. Et il a plongé aux tréfonds de l'Univers pour cibler des quasars situés à des milliards d'années-lumière. Ces noyaux extrêmement lumineux de galaxies presque immobiles dans le ciel sont utilisés comme références pour les mouvements des autres astres et les distances. Le nouveau catalogue Gaia comprend 1,61 million de quasars. Ceux-ci ont permis de mesurer très finement l'accélération du barycentre de notre système solaire par rapport à l'Univers lointain. Une telle accélération provoque un déplacement lent et apparent de tous les objets dans le ciel, appelé aberration. Invisible pour les plus proches, celle-ci est détectable pour les quasars. Avec Gaia, les scientifiques ont déterminé pour la première fois que la trajectoire du système solaire est déviée, à la distance du centre de la Galaxie (26 000 années-lumière), du diamètre d'un atome chaque seconde.

Bien d'autres découvertes sont attendues d'ici à 2022, date où le catalogue complet sera publié. On aura notamment des informations sur les étoiles les plus proches du Soleil dont 30 % posséderaient des planètes géantes gazeuses. Et il faudra patienter jusqu'en 2028 pour le catalogue final qui marquera la fin d'une mission qui a d'ores et déjà révolutionné notre connaissance de la Voie lactée. ■

Joël Ignasse @IgnasseJ



BOREXINO COLLABORATION/INFN

Le cœur du détecteur, installé sous la montagne du Gran Sasso (italie), qui a permis de capturer des neutrinos de très faible énergie.

La mécanique solaire décryptée

L'expérience Borexino a observé des neutrinos issus du cycle carbone-azote-oxygène, l'un des mécanismes de production d'énergie du Soleil.

LE FONCTIONNEMENT interne du Soleil n'a plus de secrets ! Des chercheurs viennent en effet de confirmer l'existence d'un « cycle carbone-azote-oxygène » (CNO) qui produit 1 % de l'énergie libérée par notre étoile (le reste provient de réactions entre protons) et qui devient majoritaire dans les étoiles à partir de 1,3 masse solaire. Ce cycle décrit une formation d'hélium à partir de noyaux d'oxygène et d'azote, le carbone servant de catalyseur. Cette réaction s'accompagne d'une production de neutrinos. Expédiés dans l'espace, ce sont les seuls « témoins » du processus se déroulant au cœur de l'astre. Mais la masse et l'énergie très faibles de ces particules rendent leur observation délicate.

C'est néanmoins l'exploit accompli par l'expérience Borexino, menée au Laboratoire national du Gran Sasso, en Italie. Afin d'éviter tout bruit parasite, elle est installée depuis 2007 sous un kilomètre de roches. Le cœur du détecteur est constitué d'une sphère en Nylon de 8,5 m de diamètre, remplie de 280 t d'un scintillateur liquide. La plupart des neutrinos traversent la Terre sans interagir avec la matière. Mais de temps à autre, l'un d'entre eux heurte un électron du scintillateur... La collision met alors en mouvement un électron dit de recul. Ce mouvement s'accompagne de l'émission de photons, détectés par les 2212 capteurs de lumière répartis autour du cœur. Bien qu'une surface de 1 cm^2 soit traversée par 60 milliards de neutrinos toutes les secondes, il ne se produit que quelques dizaines d'éclats par jour pour 100 t de scintillateur. Il a ainsi fallu cinq ans pour obtenir un résultat significatif ! Au-delà de la confirmation de l'existence du cycle CNO, ces neutrinos offriront également une mesure directe de la quantité d'éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium présents dans le Soleil, les modèles ne s'accordant pas sur cette quantité. Si l'expérience Borexino doit cesser bientôt, elle livrera encore bien des enseignements à mesure que ses données seront analysées.

Fabrice Nicot @fnicot07

AURÉLIEN ALVAREZ

PAR AURÉLIEN ALVAREZ *

Pour l'honneur de l'esprit humain

Si on demande à un mathématicien à quoi sert ce qu'il fait, il pourra — selon son humeur — vous répondre, comme on le prête à Laurent Schwartz (1915-2002), que *« les mathématiques, ça sert à faire de la physique. La physique, ça sert à faire des Frigidaires. Les Frigidaires, ça sert à y mettre des langoustes, et les langoustes, ça sert aux mathématiciens qui les mangent et sont alors dans de bonnes dispositions pour faire des mathématiques, qui servent à la physique, qui sert à faire des Frigidaires qui... »*. Mais, las qu'on lui pose cette question pour la énième fois, il pourra aussi bien vous « envoyer promener » en vous rétorquant qu'il n'est pas nécessaire que tout doive toujours servir à quelque chose, ou simplement vous répondre : *« Pour l'honneur de l'esprit humain. »* Cette formule est célèbre depuis un livre de Jean Dieudonné (1906-1992)* portant ce titre et extraite de la correspondance entre Adrien-Marie Legendre et Jacob Jacobi au XIXe siècle dans laquelle ce dernier rappelle que Joseph Fourier avait regretté qu'Abel et lui se désintéressent du mouvement de la chaleur : *« Il est vrai que M. Fourier avait l'opinion que le but principal des mathématiques était l'utilité publique et l'explication des phénomènes naturels ; mais un philosophe comme lui aurait dû savoir que le but unique de la science, c'est l'honneur de l'esprit humain, et que, sous ce titre, une question de nombres vaut autant qu'une question du système du monde. »*

> « La question de savoir si et comment les mathématiques pourraient améliorer le monde n'a en général pas de réponse »

En 1994, William Thurston (1946-2012) a proposé une réflexion sur le progrès des mathématiques et a indirectement apporté à son tour une réponse à cette question. *« Les mathématiques apportent de la clarté et de la compréhension. Pas des théorèmes pour eux-mêmes. [...] Le monde ne souffre pas d'une trop grande clarté (c'est le moins qu'on puisse dire). La question de savoir si, et comment, des mathématiques spécifiques pourraient améliorer le monde n'a en général pas de réponse. Mais, collectivement, les mathématiques sont extrêmement importantes. »* ■

* *Pour l'honneur de l'esprit humain*, Jean Dieudonné, Hachette, 1987.

* Professeur à l'ENS de Lyon.

Devenir ingénieur(e) à l'heure du Covid-19

ANTOINE DEVOUARD/REA

Si la crise sanitaire ralentit l'insertion professionnelle des jeunes ingénieur(e)s, les transitions numérique et environnementale en cours sont plus que jamais porteuses de grandes opportunités à moyen terme. Il est temps de faire les bons choix.

Par Sylvie Lecherbonnier

« LE XXIe SIÈCLE SERA MARQUÉ *par deux grandes transitions : numérique et environnementale. Les jeunes femmes et les jeunes hommes qui s'engagent aujourd'hui dans des études d'ingénieur vont avoir une responsabilité accrue, étant impliqués en amont dans la conception des systèmes et technologies qui permettront ces transitions.* » François Rousseau, directeur de l'École des mines à Nancy, se projette largement au-delà de la crise sanitaire que nous traversons en raison de la pandémie mondiale de Covid-19 qui paralyse une grande partie de l'économie et perturbe la formation des plus jeunes. « *Celles et ceux qui sont diplômés aujourd'hui travailleront… jusqu'en 2060 !* », rappelle-t-il. Et beaucoup sont demandeurs de ces changements, comme le prouve le Manifeste étudiant pour un réveil écologique signé par 32 000 jeunes Françaises et Français depuis deux ans, qui refusent de travailler dans des entreprises qui n'œuvreraient pas à la transition écologique.

Les écoles d'ingénieur(e)s, qui accueillent 150 000 étudiants (dont 28 % de filles), font donc évoluer leurs formations pour répondre à la fois aux attentes de leurs élèves, aux besoins des entreprises et aux aspirations de la société. Côté transition environnementale, les temps de cours consacrés à l'analyse du cycle de vie ou des enjeux climatiques augmentent. Quant au numérique, il trouve sa place dans des cursus spécifiques mais aussi dans des formations liées à la construction ou à l'agronomie. Les enseignements liés aux sciences humaines et sociales sont également renforcés pour mieux appréhender ces transformations sociétales. « *Il ne s'agit pas d'approfondir d'emblée tous les sujets mais d'ouvrir l'esprit et de semer des graines utiles* », estime François Rousseau. Les cursus généralistes où la spécialisation est progressive sont alors un atout.

Méthodologie

Les tableaux qui figurent dans ce dossier ont été établis à partir des recommandations des responsables des cursus et des recruteurs interrogés. Ils visent à donner des exemples de formations à la pointe des évolutions en cours et ne constituent en aucun cas un palmarès. Options, filières et majeures indiquées entre parenthèses sont le plus souvent à choisir en fin de cursus.

Redonner une dimension politique au métier

La pédagogie par projet prisée par ces formations aide à ouvrir le champ des possibles. Les écoles tirent parti de la diversité des promotions pour les faire travailler sur des projets réels. Schématiquement, les élèves issus des classes préparatoires aux grandes écoles (43 % des promotions aujourd'hui) apportent leurs connaissances théoriques et les diplômés de BTS et DUT (18 %)

SYLVIE GUESSAB

« Nous voulons faire travailler les étudiants sur des sujets prospectifs »

Sylvie Guessab, directrice de l'atelier des transitions, campus de Metz, CentraleSupélec

◀ **Les formations hybrides,** associant par exemple numérique et biologie, doivent préparer des multispécialistes capables de répondre à des enjeux actuels comme nourrir la planète. (Ici, un laboratoire de l'Inra, à Montpellier, utilisant un robot de pipettage.)

leurs compétences pratiques. À l'instar de ce qui se passe ensuite dans la vie professionnelle.
Certains établissements vont plus loin en proposant des projets interdisciplinaires. L'École des mines de Nancy partage ainsi son campus avec l'école de management ICN et l'École nationale supérieure d'art et de design : chaque élève travaille sur au moins un projet Artem (art, technologie, management) pendant son cursus. L'école Junia à Lille — qui rassemble trois écoles : généraliste, numérique et agronomie —, mise aussi sur l'interdisciplinarité. *« Cette hybridation permettra de répondre aux enjeux comme nourrir la planète, développer la transformation numérique et industrielle, accélérer la transition énergétique et urbaine, ou encore renforcer les technologies de la santé et du bien-vivre »*, expose son directeur Thierry Occre. Son établissement propose un cycle préparatoire intégré qui allie numérique et biologie pour impulser cette dynamique dès le début des études supérieures.
Dans cette nouvelle approche, l'expérimentation est de mise. CentraleSupélec vient de transformer son campus à Metz en « atelier des transitions ». Une dizaine d'étudiants viendra y tester de nouveaux projets et modules de formation, en année de césure, à partir de septembre. *« Nous voulons faire travailler les étudiants sur des sujets prospectifs, leur faire croiser des sociologues ou des urbanistes,* détaille Sylvie Guessab, directrice du projet. *Nous devons redonner une dimension politique au métier d'ingénieur.* » Une manière de remettre la science et la technologie au cœur des décisions à venir. ■

ORIENTATION

Parcoursup : la réforme du bac rebat les cartes

Le bac S, c'est fini ! En 2021, le nouveau bac général — avec ses 12 spécialités — entre en vigueur. Les élèves de première en choisissent trois pour n'en conserver que deux en terminale. En sciences, ces spécialités sont au nombre de cinq : mathématiques ; physique-chimie ; sciences de vie et de la Terre ; numérique et sciences informatiques ; sciences de l'ingénieur. Grande nouveauté : la plate-forme Parcoursup, qui gère les voeux d'orientation des futurs étudiants, doit désormais prendre en compte les notes obtenues à ces épreuves de spécialité, passées *a priori* en mars. La réforme vient ainsi chambouler toutes les procédures d'admission dans toutes les filières ! Obligeant les écoles postbac à s'adapter en restructurant les épreuves de leurs concours communs.

TRANSITION ÉCOLOGIQUE

SÉBASTIEN ORTOLA/REA

Dans le domaine des transports et de leur mise en œuvre, de nombreuses start-up développent des technologies innovantes, nécessitant des cursus transversaux. (Ici, mise au point d'une peinture pour piste cyclable, qui émet de la lumière sans source lumineuse, par la société Olikrom.)

Inventer un autre monde

La transition environnementale requiert des ruptures technologiques qui font naître de nouveaux métiers.

BIENVENUE DANS LA RECHERCHE-DÉVELOPPEMENT, où un jeune ingénieur sur cinq commence sa carrière aujourd'hui. C'est en effet dans des bureaux d'études et sur des postes qui ne sont pas forcément estampillés « transition » que se conçoivent des technologies plus durables de demain. *« Il s'agit surtout d'imaginer de nouveaux systèmes, une transformation inédite dans l'histoire de l'humanité qui va demander beaucoup de créativité ! Au-delà de la technologie, il faudra s'intéresser aux aspects réglementaires, économiques et sociétaux »*, affirme Hughes-Marie Aulanier, expert de Carbone 4, un cabinet de conseil spécialisé dans la transition énergétique. Lors de ses recrutements, il apprécie ainsi les jeunes filles et garçons qui possèdent une formation complémentaire de type sciences po ou sciences humaines pour *« ouvrir leurs écoutilles »*. Son cabinet, créé il y a trois ans avec 30 salariés, en compte aujourd'hui 70. *« La transformation bas carbone de l'économie concerne tous les secteurs et les entreprises se préparent à cette nouvelle donne »*, assure l'expert. Le plan de relance annoncé en septembre 2020 par le gouvernement pourrait donner un coup d'accélérateur. La rénovation énergétique des bâtiments, la décarbonation de l'industrie ou le développement de l'hydrogène font partie des axes annoncés. *« Les ingénieurs qui ont une bonne maîtrise de la comptabilité carbone et des enjeux énergie-climat ont un boulevard devant eux »*, insiste Hughes-Marie Aulanier.

ENVIRONNEMENT

École/université	Ville	Intitulé du diplôme	Niveau d'entrée*	Durée	Coût**
Agrocampus Ouest	Angers, Rennes	ingénieur (spécialisation « ingénierie des espaces végétalisés urbains »)	après bac + 2	3 ans	1765
Avignon Université	Avignon	CMI (Cursus master ingénierie) ressources en eau et environnement	après bac	5 ans	243
Centrale Nantes	Nantes	ingénieur (ingénierie de la transition écologique)	après bac + 2	3 ans	2500
École polytechnique	Palaiseau	ingénieur (approfondissement « sciences pour les défis de l'environnement »)	après bac + 2	4 ans	gratuit
Junia ISA Lille	Lille	ingénieur (approfondissement « management de la performance environnementale globale »)	après bac	5 ans	8000

* Premier niveau d'entrée.** Frais de scolarité en euros pour une année de formation au niveau master

ÉNERGIE

École/université	Ville	Intitulé du diplôme	Niveau d'entrée*	Durée	Coût**
Arts et Métiers	9 campus	ingénieur (expertise énergie bas carbone et système énergétique efficient)	après bac + 2	3 ans	601
ECE	Paris/Lyon	ingénieur (majeure nouvelles énergies et environnement)	après bac	5 ans	9650
Grenoble INP - ENSE3	Grenoble	ingénieur (filière ingénierie de l'énergie électrique)	après bac + 2	3 ans	601
INSA Lyon	Lyon	ingénieur (génie énergétique et environnement)	après bac	5 ans	601
Mines Nancy	Nancy	ingénieur (parcours transition énergétique)	après bac + 2	3 ans	2500

* Premier niveau d'entrée. ** Frais de scolarité en euros pour une année de formation au niveau master

ENVIRONNEMENT

Des cursus transversaux

À côté des spécialisations en ressources en eau, gestion des déchets ou prévention des risques, se développent des cursus plus transversaux autour de la transition écologique. Ainsi à Centrale Nantes, l'option ingénierie de la transition écologique arrive en dernière année de la formation généraliste. Les étudiants y approfondissent les concepts d'économie circulaire et d'écoconception à travers des études de cas, des conférences et la conduite de projets. *« Celles et ceux qui suivent ce programme sont le plus souvent très engagés sur les questions environnementales*, souligne le responsable de l'option, Jean-Marc Benguigui. *Ils ne veulent pas forcément rejoindre une entreprise mais créer la leur ou s'impliquer au niveau local dans des projets humanitaires, des fermes ou des éco-villages.* » L'économie sociale et solidaire, les collectivités, les bureaux d'études sur l'énergie ou l'écohabitat font partie des débouchés pour ces profils.

ÉNERGIE

Mix et efficacité

La diversification des sources d'énergie (solaire, éolienne, électrique...) apporte son flot d'innovations. *« Nous sommes en train de passer d'un système centralisé où le nucléaire produit l'électricité à un système décentralisé comprenant de petites unités d'énergies renouvelables partout sur le territoire et un mix énergétique à piloter en temps réel. De nouveaux modes de gestion apparaissent pour lesquels le numérique nous apporte un suivi et une précieuse aide à la décision* », explique Jean-Louis Dirion, enseignant-chercheur à l'IMT Mines d'Albi. L'école a ainsi ajouté depuis deux ans un parcours *« transition numérique et énergie »* au domaine d'approfondissement écoactivités et énergie. *« Nous suivons les évolutions du secteur. Nous nous sommes concentrés dès l'origine sur la production d'énergies renouvelables, puis nous y avons ajouté un parcours "bâtiment à énergie positive" en 2010 et, dernièrement, celui sur le numérique »*, détaille Patricia Arlabosse, directrice adjointe du laboratoire Rapsodee (Recherche d'Albi en génie des procédés des solides divisés, de l'énergie et de l'environne-

HUGUES-MARIE AULANIER

« Il s'agit surtout d'imaginer de nouveaux systèmes, une transformation inédite dans l'histoire de l'humanité »

Hughes-Marie Aulanier, cabinet de conseil Carbone 4

Devenir ingénieur(e)

BÂTIMENT

École/université	Ville	Intitulé du diplôme	Niveau d'entrée*	Durée	Coût**
École supérieure du bois	Nantes	ingénieur (approfondissement construction bois)	après bac + 2	3 ans	5750
ESITC Caen	Caen	ingénieur (spécialité bâtiments durables et intelligents)	après bac	5 ans	7050
ESTP	Paris, Dijon, Troyes	ingénieur (spécialité bâtiments et villes durables)	après bac + 2	3 ans	8250
IMT Mines Albi	Albi	ingénieur (parcours bâtiment à énergie positive)	après bac + 2	3 ans	2150
Université Grenoble-Alpes	Grenoble	master génie civil (parcours construction durable et environnement)	après bac + 3	2 ans	243

* Premier niveau d'entrée. ** Frais de scolarité en euros pour une année de formation au niveau master

TRANSPORTS

École/université	Ville	Intitulé du diplôme	Niveau d'entrée*	Durée	Coût**
École des ponts ParisTech, Mines ParisTech, École polytechnique	Marne-la-Vallée	master transport et développement durable	après bac + 4	15 mois	6400
ENTPE	Lyon	ingénieur (approfondissement transports et territoires)	après bac + 2	3 ans	601
ESTACA	Paris-Saclay, Laval	ingénieur (automobile spécialisation nouvelles énergies et environnement)	après bac	5 ans	8390
ISAE-Supaero	Toulouse	ingénieur (domaine énergie, transports, environnement)	après bac + 2	3 ans	2895
Université Paris-Saclay	Paris-Saclay	master 2 mobilité durable, transition et société	après bac + 4	1 an	243

* Premier niveau d'entrée. ** Frais de scolarité en euros pour une année de formation au niveau master

ment). L'école, comme d'autres, veut aujourd'hui sensibiliser les jeunes dès le début du cursus : *« Dès cette année 2021, la transition écologique et énergétique fait partie du tronc commun, afin que tous les étudiants appréhendent ses enjeux dans leur complexité »*, souligne l'experte.

Ces évolutions font naître de nouveaux métiers. Diplômé depuis trois ans de l'ECE, Thomas Garcia est devenu *energy manager* au sein de Citron, une start-up spécialisée dans la performance énergétique des bâtiments. Un métier au croisement des secteurs de la construction, de l'énergie et du numérique. Lorsque le jeune ingénieur a intégré la start-up en 2017, celle-ci comptait une douzaine de collaborateurs, contre près de 40 aujourd'hui. Son quotidien ? Auditer des bâtiments pour proposer des scénarios d'efficacité énergétique. L'installation de capteurs permet alors de suivre, grâce à une plateforme numérique, la consommation d'énergie d'un lieu en temps réel. *« L'énergie la plus propre, c'est celle que l'on n'a pas consommée »*, ironise Thomas Garcia.

PATRICIA ARLABOSSE

« À partir de cette année, la transition écologique et énergétique fera partie du tronc commun, afin que tous les étudiants appréhendent ses enjeux dans leur complexité »

Patricia Arlabosse, IMT Mines Albi

BÂTIMENT
Décloisonner les disciplines

Les innovations dans l'énergie comme dans le bâtiment sont portées par les évolutions réglementaires. La loi sur la transition énergétique de 2015 prévoit ainsi un niveau de performance énergétique conforme aux normes « bâtiment basse consommation » pour l'ensemble des logements d'ici à 2050 et une réduction de 40 % des gaz à effet de serre dans le domaine de la construction en 2030 (par rap-

Pour répondre au défi de la performance énergétique, le secteur du bâtiment est contraint de se renouveler et d'innover. (Ici, le projet YHNOVA d'impression en 3D d'une maison aux parois isolantes, réalisé à l'université de Nantes.)

© JEAN CLAUDE MOSCHETTI/REA

port à 1990). « *Les jeunes ingénieurs ont toute leur place dans cette transformation*, affirme Joël Cuny, directeur de l'ESTP, une école spécialisée dans la construction. *La recherche-développement doit s'intensifier pour être à la hauteur de ces enjeux.* »

La question du cycle de vie des bâtiments est désormais beaucoup plus présente dans les formations. Et dès la première année, la réalisation de projets permet de décloisonner les disciplines. Joël Cuny le constate : « *Nous ne pouvons plus penser le bâtiment comme un isolat. Il fait partie d'un écosystème plus vaste — le quartier, la ville, le territoire — auquel il est connecté. Nous devons inculquer à nos élèves cette approche plus globale. Ce que nous appelons le "jumeau numérique", qui permet de modéliser en temps réel les performances attendues, nous y aide.* » Les outils numériques ont ainsi fait leur entrée en force dans les formations d'ingénieurs liées au BTP (bâtiment et travaux publics).

TRANSPORTS

Vers des véhicules hybrides, électriques et à hydrogène

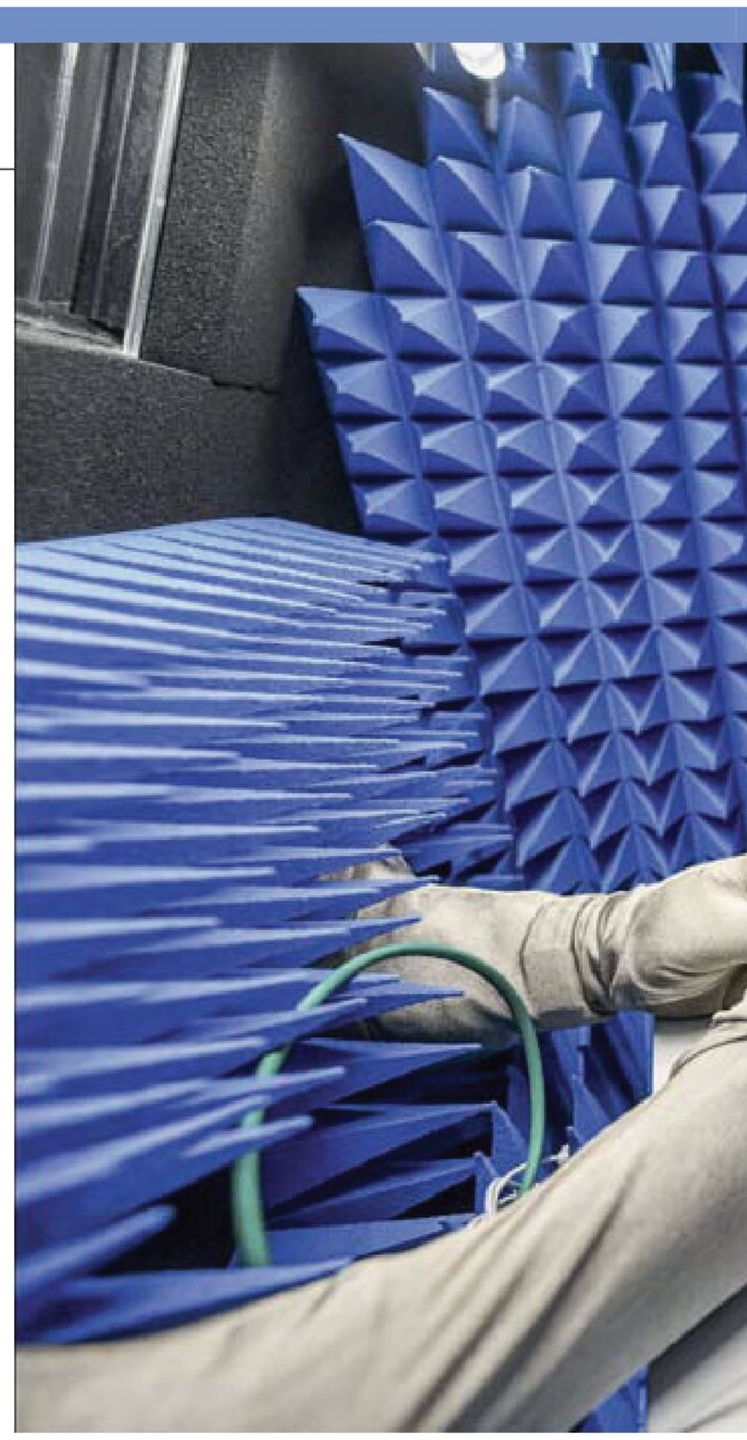
Fabriquer les prochaines générations d'avions et de véhicules électriques, hybrides et à hydrogène. Tel est l'un des enjeux affichés des fonds de soutien aux investissements des secteurs automobile et aéronautique du plan de relance gouvernemental. « *La crise accélère les mutations technologiques*, constate le directeur de l'ISAE Supaero à Toulouse, Olivier Lesbre. *En devenant ingénieurs, les jeunes femmes et hommes vont préparer cet avenir. Concevoir un avion à hydrogène d'ici à 2035 suppose de relever un grand nombre de défis. À titre d'exemple, il faudra savoir faire évoluer le design des appareils pour utiliser cette énergie plus volumineuse que le kérosène.* » Beaucoup de travail en vue dans les bureaux d'études ! Pour être actrice de cette transition, l'école a créé depuis 2013 avec Airbus une chaire baptisée CEDAR (Chaire for Eco-Design of AIRcraft). Dans ce cadre, des étudiants de dernière année peuvent acquérir un certificat « aéronautique et environnement » à l'issue d'une formation de deux mois.

Côté automobile, la prise en compte des enjeux environnementaux fait aussi évoluer les formations. À l'ESTACA située à Laval et Saint-Quentin-en-Yvelines, la filière automobile est dotée depuis sept ans d'une spécialisation de cinquième année « nouvelles énergies et environnement ». « *Les heures consacrées à la voiture thermique baissent d'année en année et nous renouvelons continuellement nos enseignements* », assure Christophe Delille, responsable de la filière automobile de l'école. Un cours sur le recyclage des batteries vient ainsi d'être ajouté. Les associations étudiantes qui participent à des concours comme le Shell Eco Marathon constituent un cadre plus informel pour tester de nouveaux véhicules. Une nouvelle génération décidément motrice du changement. ■

NUMÉRIQUE

Priorité à la cybersécurité

Le numérique résiste à la crise, surtout dans le domaine des données et de la sécurisation des transactions.



« LE NUMÉRIQUE RECRUTE *mais pas dans les mêmes proportions qu'avant la crise. Il faut dire que nous partions de très haut : en 2019, le secteur représentait un tiers des créations nettes d'emploi en France* », remarque Neila Hamadache, déléguée à la formation et à l'emploi du Syntec Numérique, organisation professionnelle qui regroupe 2000 entreprises. Mais pas d'inquiétude sur cet infléchissement : Les datas (données massives), l'IA (intelligence artificielle), le *cloud* (les serveurs à distance) et la cybersécurité restent des domaines majeurs très porteurs.

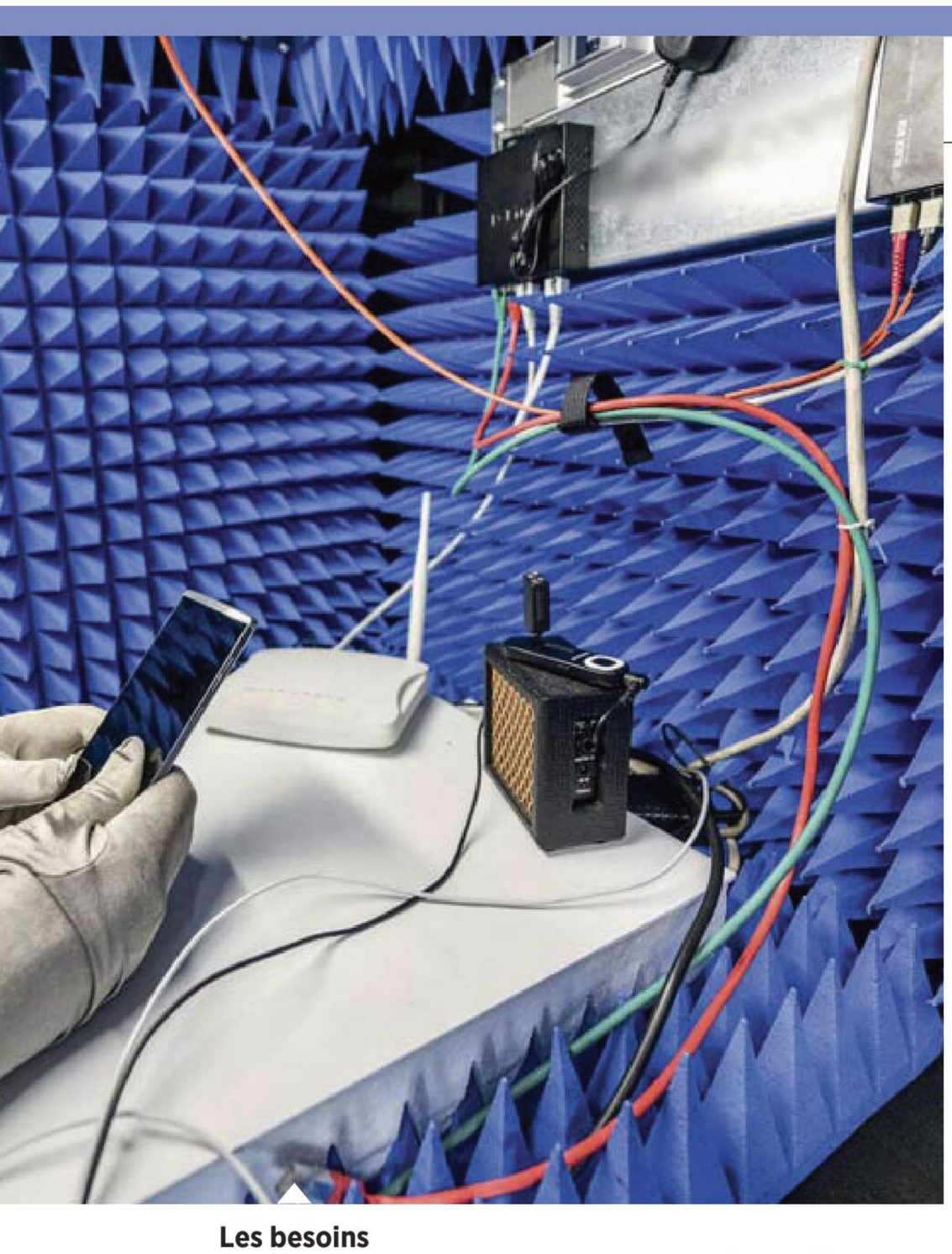
IA ET DATAS
Dans tous les domaines

Pour Neila Hamadache, c'est une évidence : « *plus l'économie française va être numérisée, plus nous allons produire de la donnée, plus nous allons avoir besoin de compétences pour la gérer et l'analyser.* » Sur ces métiers à haute valeur ajoutée, les emplois se concentrent dans les entreprises de services du numérique et les sociétés de conseil, mais de plus en plus de sociétés veulent posséder les compétences en interne. « *Nos diplômés trouvent du travail dans une plus grande diversité de secteurs qu'auparavant* », confie ainsi Joël Courtois, le directeur de l'Epita, une école d'ingénieurs informatique. Pour répondre aux besoins, cet établissement est passé en quatre ans de 200 à 600 élèves par promotion. Originellement basé à Paris, il a ouvert des campus à Lyon, Toulouse, Rennes et Strasbourg. Plus globalement, les « majeures », filières, parcours IA ou sciences des données se multiplient dans les écoles d'ingénieurs qu'elles soient spécialisées dans le numérique ou plus généralistes. Neuf recrutements sur dix dans le numérique se font à bac + 4 ou bac + 5, et le titre d'ingénieur est recherché.

IA ET DATAS

École/université	Ville	Intitulé du diplôme	Niveau d'entrée*	Durée	Coût**
ENSAE	Palaiseau	ingénieur (voie data science et sciences sociales)	après bac + 2	3 ans	1850
ENSEM - INP Lorraine	Nancy	ingénieur (spécialisation analyse de données et IA)	après bac + 2	3 ans	601
ENSTA ParisTech	Palaiseau	ingénieur (parcours intelligence artificielle)	après bac + 2	3 ans	2650
EPITA	Paris, Lyon, Rennes, Strasbourg, Toulouse	ingénieur (majeure data science et IA)	après bac	5 ans	9432
ESILV	Paris- la Défense	ingénieur (majeure data et IA)	après bac	5 ans	9100
Université Bretagne-Sud	Vannes	CMI (cursus master en ingénierie) sciences des données	après bac	5 ans	243
Université Lyon-I Claude-Bernard	Lyon	master informatique IA	après bac + 4	1 an	243

* Premier niveau d'entrée. ** Frais de scolarité en euros pour une année de formation au niveau master



XAVIER POPY/REA - NEILA HAMADACHE

Les besoins des entreprises et institutions pour assurer la sécurité de leurs systèmes réseaux sont en croissance exponentielle. (Ici, le laboratoire d'étude des virus d'Orange Cyberdefense, à Nanterre.)

> « Plus nous allons produire de la donnée, plus nous allons avoir besoin de compétences pour la gérer et l'analyser »
>
> **Neila Hamadache,** déléguée à la formation et à l'emploi du Syntec Numérique

CYBERSÉCURITÉ

En quête de vocations

S'il y a bien un domaine où les besoins ne font que croître, c'est la cybersécurité. *« Entre l'essor des objets connectés, la généralisation du télétravail pendant les confinements et les conflits géopolitiques, entreprises et institutions sont noyées sous les attaques »*, constate Joël Courtois. Cryptologue, gestionnaire de crise, analyste de la menace… Les entreprises ont besoin d'un panel d'experts de niveau bac + 5. *« L'architecte sécurité chargé d'intégrer le volet "cyber" dans la construction des systèmes et réseaux fait partie des métiers recherchés, tout comme les auditeurs chargés de vérifier le niveau de sécurité de ces systèmes par le biais notamment des tests d'intrusion »*, détaille Julie Ledoux, cheffe de division ressources humaines de l'Anssi (Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information) qui publie un panorama de ces métiers. Exemple de cette croissance du secteur, l'Agence est passée de 122 salariés en 2008 à 550 en 2020 et prévoit 40 postes supplémentaires en 2021.

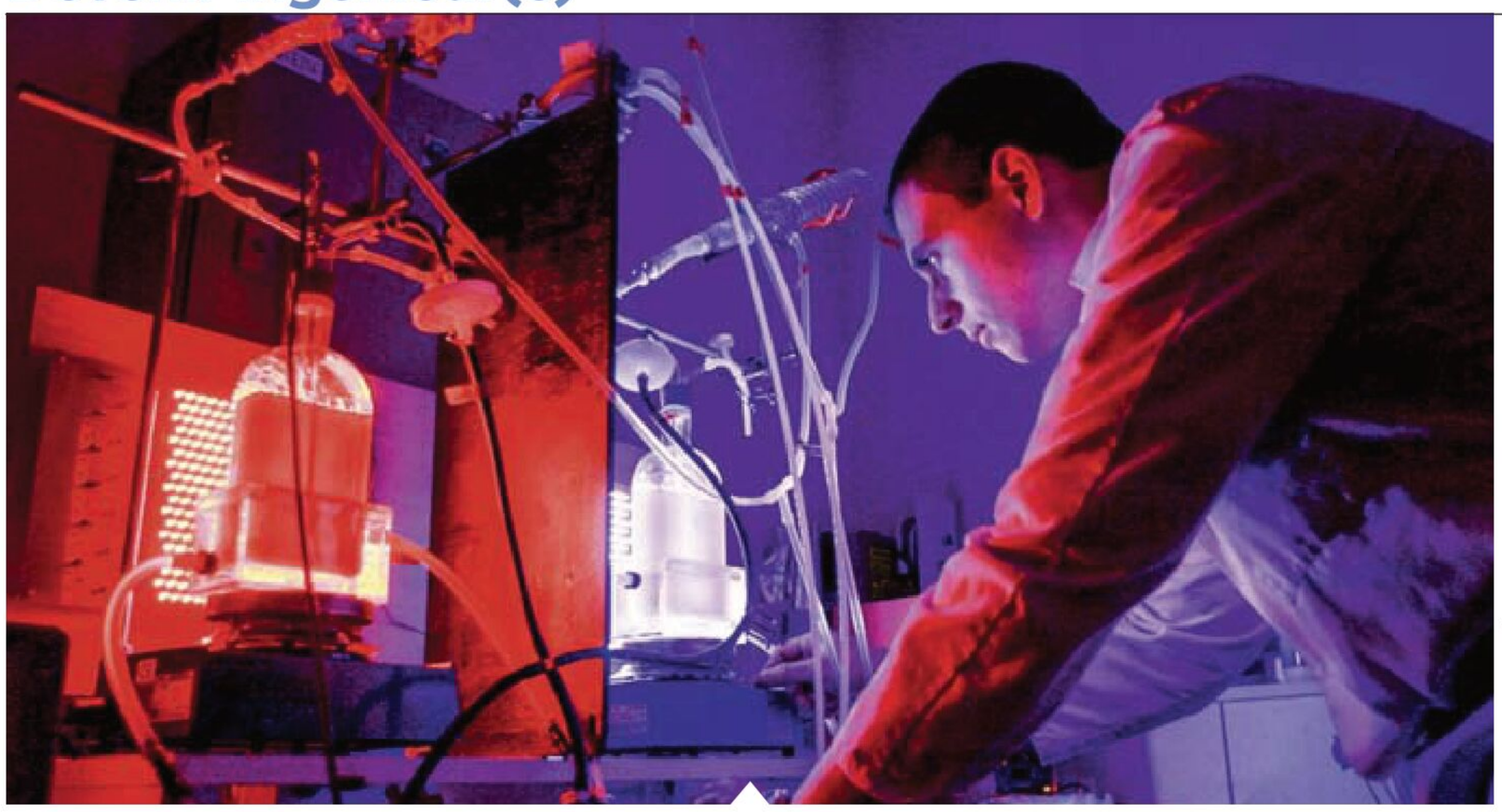
Face à cet essor, la filière a besoin de susciter des vocations. *« Il existe beaucoup de formations mais toutes ne font pas le plein »*, se désole Michel Van Den Berghe, directeur général d'Orange Cyberdefense. Il pilote le Campus Cyber qui doit ouvrir en septembre 2021 à la Défense. Son ambition ? Devenir un « lieu totem » qui réunira industriels, institutions et organismes de formation et de recherche. 2 000 m² seront dédiés à des cursus en cybersécurité de bac à bac + 5, ainsi qu'à des activités de formation continue. L'objectif est aussi de faire découvrir ce domaine au grand public. *« Il manque 2000 à 3000 ingénieurs en cybersécurité en France,* souligne Michel Van Den Berghe. *Nous devons éveiller l'intérêt des filles et des garçons dès le collège, leur montrer que nous sommes aussi utiles qu'un pompier ou un infirmier pour protéger les populations.* » De nouvelles représentations à construire. ■

CYBERSÉCURITÉ

École/université	Ville	Intitulé du diplôme	Niveau d'entrée*	Durée	Coût**
École de l'Air et Centrale Marseille	Marseille et Salon-de-Provence	mastère spécialisé Cyberscid (cybersécurité des systèmes complexes pour l'industrie et la défense)	après bac + 5	1 an	8000
ENSTA Bretagne	Brest	ingénieur (spécialité systèmes numériques et sécurité)	après bac + 2	3 ans	2200
ESIEA	Paris, Laval	ingénieur (majeure cybersécurité)	après bac	5 ans	8400
Grenoble INP - ESISAR	Valence	ingénieur (filière informatique, réseaux, cybersécurité)	après bac	5 ans	601
ISEP	Paris	ingénieur (parcours sécurité numérique et réseaux)	après bac	5 ans	8720
Université Lumière Lyon-II	Lyon	master 2 informatique - organisation et protection des systèmes d'information dans les entreprises	après bac + 4	1 an	243
UTT	Troyes	ingénieur (filière sécurité des systèmes et des communications)	après bac	5 ans	601

* Premier niveau d'entrée. ** Frais de scolarité en euros pour une année de formation au niveau master

Devenir ingénieur(e)



RICHARD DAMORET/REA - FRANCK MOUTHON

L'essor de la filière des biotech requiert des spécialistes formés aux particularités du secteur. (Ici, étude du développement de l'algue spiruline selon la longueur d'onde de la lumière, au CUST de Clermont-Ferrand.)

« Nous avons besoin de profils inter-disciplinaires »

Franck Mouthon,
président de France Biotech

SANTÉ

Des débouchés variés entre technologie et soins

Le développement des données médicales et des biotechs ouvrent de larges perspectives.

« LA SANTÉ EST UN SECTEUR *d'avenir pour les ingénieurs. La bioproduction de médicaments d'une part et les données en santé d'autre part vont être pourvoyeuses d'emploi. Dans ce cadre, nous avons besoin de profils interdisciplinaires, qui comprennent les problématiques particulières de la santé* », affirme Franck Mouthon, président de France Biotech, l'association qui fédère les entrepreneurs de l'innovation en santé. Selon une étude du Boston Consulting Group de 2017, la Health Tech pourrait créer 130 000 emplois d'ici à 2030, elle en compte 50 000 aujourd'hui.

Franck Mouthon le souligne : *« Nous travaillons sur des connaissances en cours de développement, comme la thérapie génique. Nous apprenons en marchant et l'enseignement supérieur fait preuve de beaucoup d'adaptation.* » Une chaire « intelligence artificielle en santé » a ainsi vu le jour à l'université de Paris.

Les écoles d'ingénieurs ne sont pas en reste avec l'ouverture de filières ingénierie de la santé mais aussi des spécialisations numérique et santé. Après un cursus généraliste, les élèves viennent y apprendre les spécificités du domaine médical. À l'Icam — qui développe une formation de ce type sur son site de Paris-Sénart (Seine-et-Marne) — des professionnels viennent présenter leurs métiers et des visites d'entreprises sont organisées. Les étudiants réalisent ensuite des projets commandés par des entreprises partenaires, par exemple la conception d'une main artificielle.

Des hôpitaux aux multiples start-up du secteur en passant par les grands groupes pharmaceutiques, les débouchés sont variés. *« Les réglementations évoluent. Les ARS (Agences régionales de santé) commencent aussi à recruter ces ingénieurs qui comprennent les technologies nouvelles et les besoins des patients* », note Isabelle Claude, responsable du master ingénierie de la santé à l'UTC (Université de technologie de Compiègne). Des métiers à l'interface de la technologie et du soin. ■

École/université	Ville	Intitulé du diplôme	Niveau d'entrée*	Durée	Coût**
ICAM	Lille, Nantes, Vannes, La Roche-sur-Yon, Paris-Sénart, Toulouse	ingénieur (majeure ingénierie de la santé)	après bac	5 ans	8500
ISIS	Castres	ingénieur informatique pour la santé	après bac	5 ans	601
Sup'biotech	Villejuif, Lyon	ingénieur en biotechnologies	après bac	5 ans	9939
UTC	Compiègne	master ingénierie de la santé	après bac + 3	2 ans	243

* Premier niveau d'entrée. ** Frais de scolarité en euros pour une année de formation au niveau master

LES INDISPENSABLES

NUMÉRO SPÉCIAL

SCIENCES ET AVENIR

LES INDISPENSABLES

EN -46 000
LA RENCONTRE
AVEC NÉANDERTAL

SAPIENS

LES DERNIÈRES DÉCOUVERTES

Il y a 300 000 ans, en Afrique
De Chauvet à l'Australie, un artiste hors pair
Les révélations de l'ADN
Le rôle des femmes revu par les préhistoriens

GETTY

Avec Yves Coppens, Pascal Picq, Évelyne Heyer,
Jean-Jacques Hublin, Marylène Patou-Mathis…

en vente en kiosque

La ferme s'ouvre (un peu) au bien-être animal

De nombreuses études comportementales concluent que les vaches, porcs et volailles sont bien dotés d'une conscience et ressentent des émotions. Des preuves scientifiques qui commencent à contribuer à mettre en place de meilleures conditions d'élevage industriel.

Par Loïc Chauveau @loic_chauveau

« CE N'EST PLUS UN EFFET DE MODE, *c'est une lame de fond.* » Quand Alain Boissy parle du bien-être animal, le monde de l'élevage l'écoute désormais attentivement. Ce spécialiste du comportement des ovins et bovins à l'Institut national pour la recherche sur l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) fait partie de ceux — très rares — qui dès les années 1980 ont cherché à comprendre ce qui se passait dans la tête des animaux domestiques exploités par les humains. Directeur du Centre national de référence pour le bien-être animal créé par le ministère de l'Agriculture en 2017, il est donc l'un des mieux placés pour mesurer l'évolution de la société sur le sujet. Et elle est profonde. L'initiative citoyenne pour un référendum français sur le bien-être animal, lancée en 2020 par plus de 60 associations, approche du million de signatures et 1,4 million d'Européens réclament la fin de l'élevage des poules pondeuses en cage. Impensable il y a encore quelques années. Mais l'Inrae veut désormais apporter à ce débat trente ans de travaux en éthologie et faire progresser les mentalités chez les professionnels. Pour comprendre les enjeux de ce qu'il est donc désormais convenu d'appeler le bien-être animal, il faut remonter en 1976, date à laquelle une loi en a fixé les grands principes en France. *« Tout animal étant un être sen-*

BERNARD MARTINEZ

M. MOCHET/ANDIA.FR

Dans le secteur bio (en haut), les procelets, élevés sur paille, peuvent assouvir leur besoin vital de fouir. **Dans le secteur industriel**, ils le sont sur caillebotis tandis que leur mère est immobilisée dans une cage de contention (ci-dessus).

sible, il doit être placé par son propriétaire dans des conditions compatibles avec les impératifs biologiques de son espèce », statue l'article L214 du code rural qui en découle. Quarante ans plus tard, celui-ci sert d'étendard à l'association du même nom qui a imposé le sujet dans l'actualité en diffusant des images honteuses d'abattoirs sordides et de bâtiments d'élevage délabrés et insalubres, démontrant que ces valeurs ont été ignorées. Les concentrations d'exploitations, la production à bas coût de viande ou d'œufs de mauvaise qualité ont eu raison de la santé des animaux, et l'augmentation de la taille des troupeaux a gommé la relation individuelle qu'un éleveur pouvait nouer avec son bétail.

Cette défaillance collective a incité l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) à poser en 2018 une nouvelle définition. Le bien-être animal est désormais « *l'état mental et physique positif lié à la satisfaction des besoins physiologiques et comportementaux [de l'animal], ainsi que de ses attentes. Cet état varie en fonction de la perception de la situation par l'animal* ».

Ce qui implique de mieux appréhender cet « état mental ». « *Il y a trente ans, nos recherches sur le comportement des espèces domestiquées étaient considérées comme "sympathiques", autrement dit pas très utiles* », se souvient Alain Boissy. Ces études ont pourtant abouti à très grand nombre de résultats, à commencer par la certitude que les animaux de ferme ressentent eux aussi des émotions. Ils savent également résoudre les problèmes qui se posent à eux, comme ces chèvres qui apprennent à ouvrir leur enclos et retiennent ce qui leur est enseigné par leurs congénères ou... par les chercheurs et leurs appareillages de laboratoire. En 2017, l'expertise collective menée par l'Inrae a en outre ▶

LES CINQ GRANDES CONDITIONS

La définition internationalement reconnue du bien-être animal s'appuie sur cinq grandes « libertés » formulées par le Farm Animal Welfare Council, agence indépendante britannique qui fait autorité en la matière :

- **absence de faim et de soif** avec accès libre à l'eau et à la nourriture ;
- **absence d'inconfort** incluant un abri et une aire de repos confortables ;
- **absence de douleurs, de blessures et de maladies** par des mesures de prévention et de soins ;
- **liberté d'expression d'un comportement normal** grâce à un espace de vie suffisant ;
- **absence de peur et de détresse.**

ADAPTATION

Des animaux sélectionnés pour vivre à l'air libre

GRIMAUD FRÈRESD

L'analyse des images scanner de canards, réalisée par le groupe Grimaud Frères, à Roussay (Maine-et-Loire), permet de sélectionner les oiseaux présentant une meilleure structure corporelle et donc plus aptes à se déplacer et moins sujets aux maladies.

Derrière les études comportementales — primordiales aux yeux de l'Inrae —, la sélection est également l'une des voies explorées pour tenter d'améliorer la condition animale dans un contexte d'élevage industriel. Il s'agit non plus de comprendre l'animal, mais d'en modifier le comportement au fil des générations. *« Nos travaux de sélection portaient principalement sur la productivité des animaux. Aujourd'hui, nous recherchons aussi des géniteurs qui possèdent des aptitudes à bien se comporter dans un espace libre »*, détaille Olivier Demeure, directeur scientifique du groupe Grimaud frères installé à Roussay (Maine-et-Loire). L'entreprise vend dans le monde entier des canetons et des poussins provenant de souches améliorées à chaque génération *« par monte naturelle »*, précise le groupe, qui refuse les manipulations génétiques. *« Nous ne recherchons plus seulement des poules qui sachent produire un œuf par jour, elles doivent aussi savoir gratter le sol et se comporter sans agressivité avec leurs congénères »*, poursuit Olivier Demeure. Cela impose de suivre les couples reproducteurs par puce RFID ou GPS pour connaître leur activité et leurs déplacements dans le bâtiment d'élevage. L'entreprise commercialise même des « packs bien-être » : les canetons et poussins sont proposés aux éleveurs vaccinés et avec des griffes et des becs écourtés par laser au plus jeune âge — canards et poulets étant très agressifs entre eux — pour éviter que les éleveurs le fassent sur des oiseaux plus vieux avec des outils inadaptés générant des souffrances. Enfin, Grimaud frères vient de breveter une méthode par spectrométrie qui permet de discriminer dans l'œuf les mâles et les femelles. Cela permet d'éviter le massacre à la naissance de millions de canetons femelles de race mulard refusés par les producteurs de foie gras et de millions de mâles de race Barbarie inaptes à la production de chair.

conclu que ces êtres sont bien dotés d'une conscience. *« Comme chez les humains, la conscience chez les animaux est le produit de l'interaction de différentes couches fonctionnelles, constituées par des compétences sensorielles, d'attention, de mémoire, d'émotion et de compréhension de l'environnement »*, estime Alain Boissy.
Prenez la vache. Son œil bovin est perspicace et sa vie sociale riche. Les études ont montré que le troupeau est très hiérarchisé avec des dominantes et des dominées, des relations mère-fille parfois complexes et des copines et des sœurs qui se lèchent le pelage exclusivement entre elles. *« Que la vache accepte de collaborer en donnant son lait montre que nous ne sommes pas dans le domaine de l'instinct, mais bien dans une relation voulue et assumée par l'animal »*, complète Pierre Le Neindre, principal rédacteur du

INRAE/BERTRAND NICOLAS

« Ce sont les poules les mieux dotées en capacités cognitives qui rechignent le plus à sortir des bâtiments d'élevage »

Françoise Médale, responsable du département Physiologie animale et systèmes d'élevage (Phase) à l'Inrae

rapport sur la conscience animale. Bien que son veau lui soit pourtant retiré, sa relation à l'homme perdure. Sauf si celui-ci ne remplit pas sa part de contrat. Une vache battue donne ainsi moins de lait, ont constaté les chercheurs de l'unité Bovins de l'Inrae Clermont-Ferrand.

La poule montre de grandes capacités cognitives

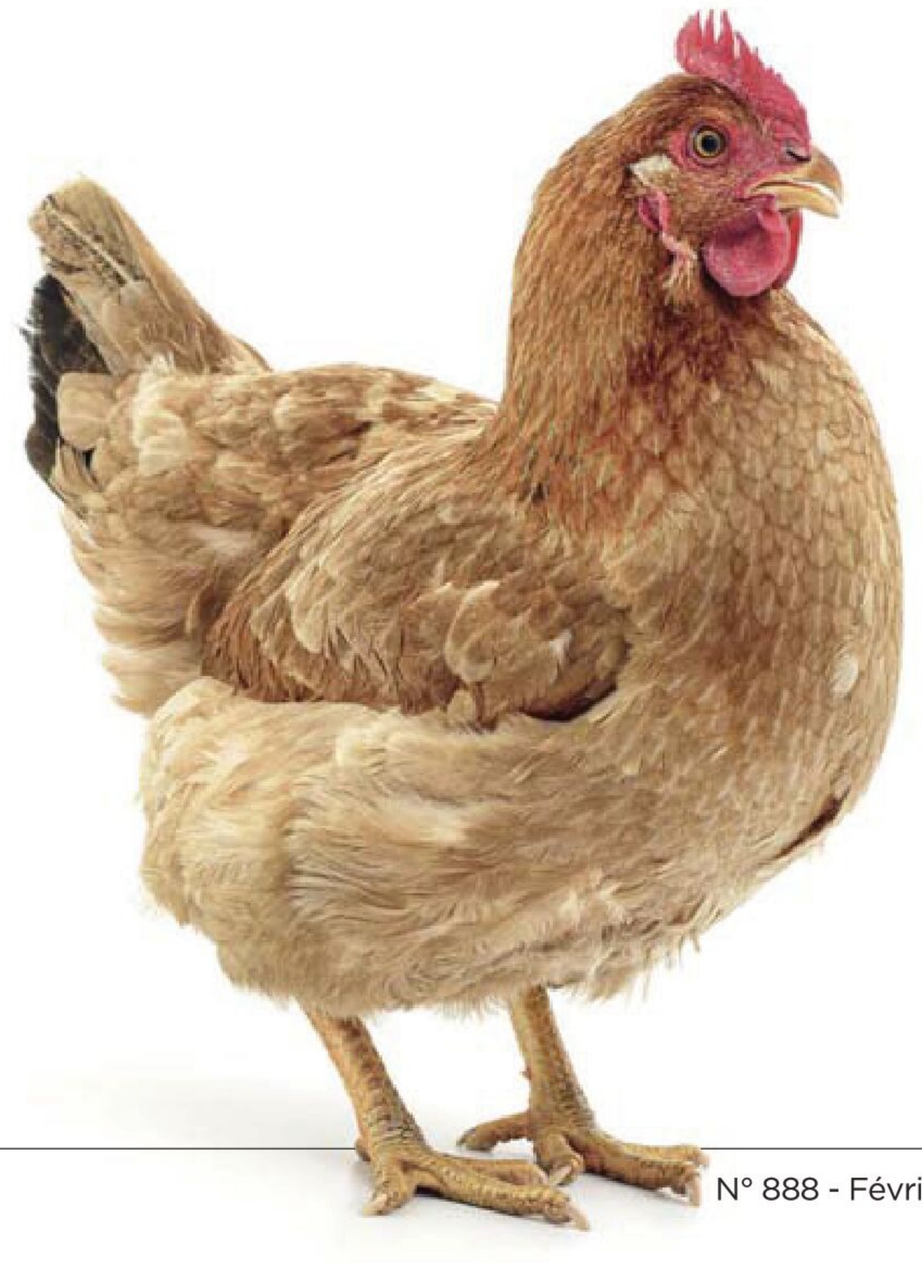
Sujet de toutes les attentions sociales actuelles, la poule fait preuve également d'une vaste palette d'émotions et de grandes capacités cognitives. Dès leur éclosion, les poussins consomment ainsi spontanément des plantes contenant des huiles essentielles leur permettant de surmonter le stress de la naissance, comme le montre une étude publiée le 30 novembre 2020, une expérience menée par des laboratoires Inrae de Bordeaux et de Tours. Les chercheurs y voient l'opportunité que ces oiseaux se soignent eux-mêmes sans qu'il soit besoin d'un apprentissage. La fin de l'élevage en cage prévue d'ici à 2025 déclenche également une foule d'études comportementales. « *Et cela réserve bien des surprises !* s'extasie Françoise Médale, directrice du métaprogramme Inrae sur le bien-être animal. *Ainsi, nous nous sommes rendu compte que ce sont les poules dotées des meilleures capacités cognitives qui rechignent le plus à sortir des bâtiments d'élevage.* »

Pour quelle raison ? Un début de réponse a peut-être été apporté par une expérience faisant appel à une mangeoire où la nourriture est protégée par un cylindre transparent. Certaines poules comprennent en effet beaucoup plus vite que d'autres qu'il faut aller au bout de la mangeoire pour contourner l'obstacle et accéder à la récompense. Publiée dans *Biology Letters* en janvier 2020, l'étude menée par l'Inrae de Tours et l'école d'ingénieurs agroalimentaires (ISA) de Lille conclut que « *les poules les moins exploratrices se distinguent des autres dans leur aptitude à traiter plus finement les informations de leur environnement et à mieux les mémoriser. Cette aptitude pourrait guider leur décision et inhiber leur motivation à explorer un parcours extérieur* ». Une autre hypothèse — non confirmée — serait que ces individus sont plus conscients des risques encourus dans un milieu ouvert.

JUNIA-COMPORTEMENT ANIMAL ET SYSTÈMES D'ELEVAGE

Des tests de comportement réalisés à l'ISA de Lille, une école d'ingénieurs agronomes, évaluent la flexibilité cognitive chez le poulet.

Le porc est certainement l'animal qui subit les conditions d'élevage les plus dures, mais où les solutions sont les plus difficiles à mettre en œuvre. 95 % des élevages français sont sur caillebotis, ce qui ôte à l'animal la possibilité — pour lui vitale — de fouir avec son groin comme c'est le cas dans les bâtiments sur paille. Et l'animal à de grandes capacités cognitives : il est capable de se reconnaître dans un miroir, selon des travaux de l'université de Cambridge (Royaume-Uni). Il a également été montré que les porcelets sont plus excités par la venue de l'un des leurs que de celle d'un humain selon une étude récente de *Scientific Reports*... mais que c'est ce dernier qu'ils préfèrent quand ils doivent choisir entre lui et un objet familier. Enfin, son expression comporte une vingtaine de cris différents que les chercheurs de l'Inrae Bretagne-Normandie ont appris à reconnaître.



SHUTTERSTOCK

Une conduite apaisée du troupeau réduit les maladies

Acquérir une meilleure connaissance des signaux vocaux devrait permettre aux éleveurs de mieux comprendre l'état d'esprit de leurs animaux, estiment les scientifiques. Or, aujourd'hui, les truies allaitent leurs petits dans des stalles de contention et jeunes et adultes sont concentrés dans des espaces si réduits qu'ils se blessent mortellement en se mordant la queue. La Commission européenne a ainsi épinglé le secteur porcin français en mars 2020 pour l'ablation de cet appendice. Elle lui reproche de ne pas avoir tenté auparavant de mettre en place des conditions d'élevage qui réduisent ces comportements agressifs, comme la mise à disposition d'objets spongieux à mâchouiller.

Comprendre le comportement de leur volaille est également un défi majeur pour les éleveurs de poulets de chair et de poules pondeuses s'ils veulent garder une production rentable. Quant aux éleveurs laitiers, les 2 % de conversion en bio montre que certains commencent à comprendre qu'une conduite apaisée de leur troupeau réduit la survenue de maladies, diminue l'usage d'antibiotiques et favorise la production de lait. « *Le bien-être animal, c'est aussi agir sur l'éleveur, lui donner les clés pour mieux appréhender les besoins de ces êtres avec qui il vit et travaille* », conclut Alain Boissy. Certes, la marche est lente, mais elle est entamée. ■

Le secret des arbres à poison

Vénéneux, toxiques, urticants, acérés… voici les trois arbres les plus dangereux du monde. L'identification de leurs toxines met les chercheurs à rude épreuve !

« Toucher un gympie-gympie, *c'est comme être brûlée à l'acide et électrocutée en même temps !* », témoigne l'écologue Marina Hurley, de l'université de Sydney (Australie). *« J'en ai fait l'expérience ! La douleur dure de six à huit heures… Mais selon les cas médicaux rapportés, elle peut persister des jours, voire des semaines* », renchérit Irina Vetter, de l'université du Queensland à Brisbane (Australie). Saluons ces deux héroïnes de la science ! Elles n'ont pas hésité, chacune de leur côté, à se frotter à l'arbre le plus vénéneux du monde pour tenter de percer le secret de ce végétal de la famille des urticacées, celle des orties.

De multiples aiguillons hypodermiques

Leur sacrifice n'aura pas été vain : le dernier résultat, paru *Sciences Advances* explique l'atrocité de la douleur. *« Comme les araignées, le gympie-gympie injecte des peptides neurotoxiques dans l'organisme, même quand on ne fait que le frôler* », détaille Irina Vetter. Parmi les six espèces du genre *Dendrocnide* (du grec *dendros*, arbre, et *knidé*, ortie), communes dans les forêts de l'est du continent australien, la plus dangereuse est donc *Dendrocnide moroides*, *alias* gympie-gympie ou arbre araignée. Les chercheurs savaient déjà, depuis la thèse de Marina Hurley dans les années 2000, que les feuilles de l'arbuste sont couvertes de poils feutrés, comme autant de multiples aiguillons hypodermiques, qui, au moindre contact, se détachent et pénètrent la peau du malheureux qui s'est aventuré trop près. Délivrant un poison qui a conduit un grand nombre d'humains à l'hôpital, poussant même certains au suicide et tuant également chevaux, mammifères brouteurs et chiens, selon les registres historiques. *« Les poils peuvent rester dans la peau jusqu'à six mois, et déclencher de nouvelles brûlures si on la presse ou la lave à l'eau chaude ou froide* », explique Marina Hurley. Pis, la toxine est stable, résistante à la chaleur et conserve ses propriétés douloureuses pendant des décennies. Les spécimens botaniques séchés collectés il y a plus de cent ans peuvent encore blesser !

Restait à identifier les principales toxines de ces arbustes. C'est chose faite, donc, depuis qu'Irina Vetter et Edward Gilding ont isolé en octobre 2020 un groupe de peptides composé de 36 acides aminés, très différents de tout ce qui avait été trouvé auparavant dans des végétaux. *« Ces toxines ont une structure en nœud à trois dimensions ressemblant à celle des venins sécrétés par les araignées, les scorpions et les escargots marins en forme de cônes* [famille des conidae] *qui ont déjà tué des baigneurs* », explique Edward Gilding. Pour comprendre, les scientifiques ont étudié leur effet sur les neurones sensoriels de souris et observé ainsi qu'elles se lient aux canaux ioniques, entraînant l'activation — voire l'affolement — des récepteurs de la douleur. *« Une infime quantité de ce poison suffit pour que ces derniers s'agitent comme des fous !* », détaille Irina Vetter.

J.-E. ROCHE/NATUREPL/EBPHOTO - ALAMY/PHOTO12

Mancenillier

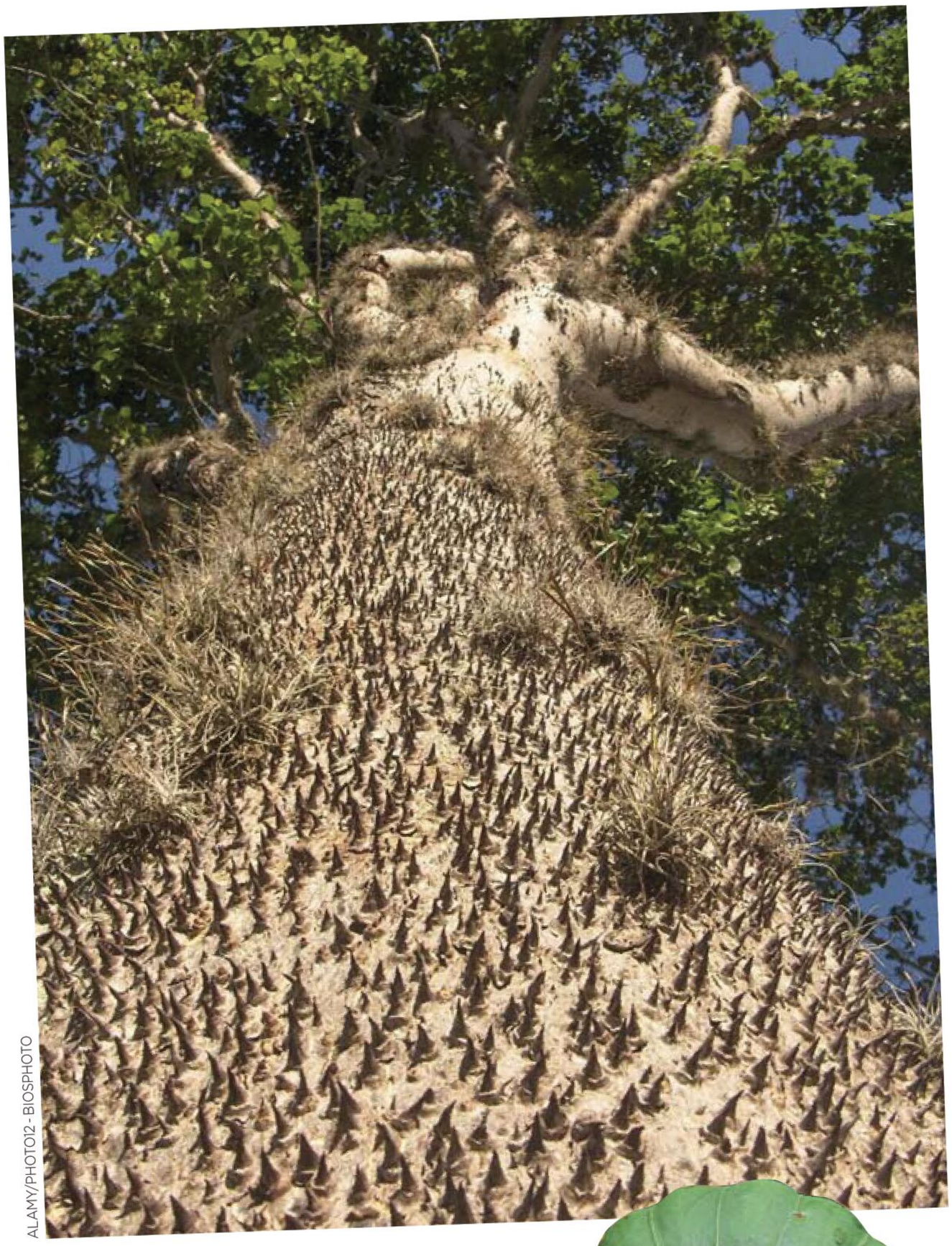
(Hippomane mancenilla)

Hauteur : 5 à 10 m
Localisation : Antilles et Amérique centrale et du Sud tropicales. Sa sève et ses fruits en forme de pomme recèlent des substances inflammatoires, qui provoquent de graves lésions des organes internes ou externes.

TRAUMATISMES

Mortel cocotier ?

2,5 % des patients admis à l'hôpital en Papouasie-Nouvelle Guinée y entrent… pour blessures dues à une chute de noix de coco, selon une étude de Peter Barss. Nullement offensé par son « IgNobel » (prix récompensant des études jugées farfelues), le Canadien espère que d'autres chercheurs lanceront une recherche internationale pour apprécier la gravité réelle du danger dû aux cocotiers. Le chiffre de 150 morts annuelles souvent divulgué n'a jamais été vérifié.

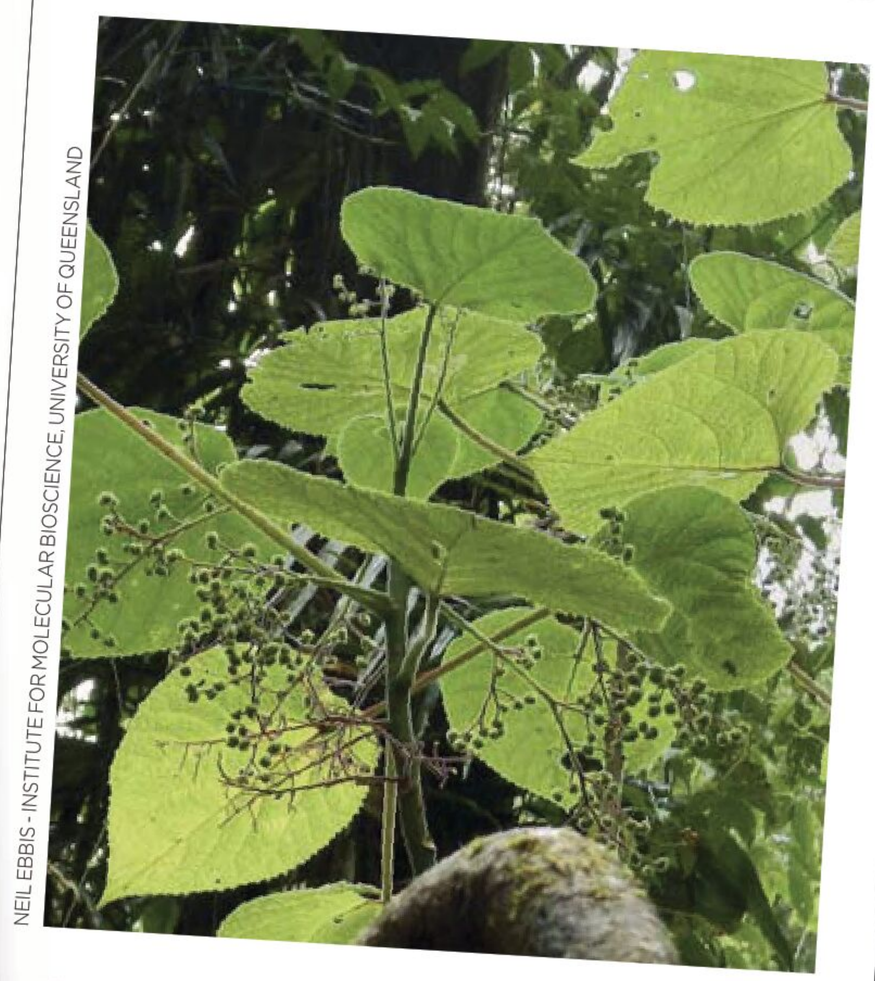


ALAMY/PHOTO12 - BIOSPHOTO

Arbre bombardier

(Hura crepitans)

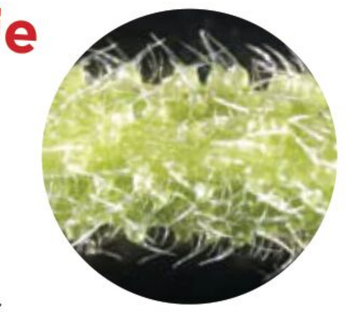
Hauteur : 27 à 40 m
Localisation : Amazonie et Amérique tropicale.
Les épines de son tronc sont très toxiques, ses fruits (crus) provoquent diarrhées et vomissements potentiellement mortels.



NEIL EBBIS - INSTITUTE FOR MOLECULAR BIOSCIENCE, UNIVERSITY OF QUEENSLAND

Gympie-gympie

(Dendrocnide moroides)



Hauteur : 3 m
Localisation : Australie.
Ses feuilles atteignent jusqu'à 50 cm, ses tiges et fruits roses sont couverts de poils urticants très toxiques et douloureux occasionnant des douleurs pendant des mois voire des années.

Dans une cellule attaquée par ces toxines, les canaux ne se ferment plus normalement, empêchant la cellule de désactiver le signal de douleur. Une stratégie extrêmement efficace qui semble être le fruit d'une évolution spectaculaire, la neurotoxine ressemblant à un venin dans sa structure moléculaire mais aussi dans la façon dont elle est déployée par injection. « *Il semblerait que deux processus évolutionnaires très différents — l'un animal, l'autre végétal — ont convergé pour devenir les plus douloureux au monde* », souligne Irina Vetter. « *Pour ces arbustes, c'est une façon de se défendre contre les animaux qui veulent les brouter* », estime Marina Hurley. Mais pourquoi avoir développé de tels poisons alors que contrairement aux animaux, les végétaux n'ont pas besoin de tuer pour se nourrir ? Le mystère reste entier. « *Ce double processus évolutif nous offre un outil inestimable pour comprendre comment la douleur est provoquée et peut-être trouver de nouveaux traitements pour la maîtriser* », poursuit la chercheuse. D'autant que seuls le pademelon à pattes rouges, un petit marsupial australien, et des coléoptères nocturnes (*Prasyptera mastersi*) parviennent à s'en régaler sans dommage... Percer le secret de leur résistance pourrait, là aussi, être très riche d'enseignement.

Comme l'arbre araignée australien, le mancenillier, qui borde plages et mangroves aux Antilles, ainsi qu'en Amérique centrale et du Sud, a la réputation d'avoir rendu des chevaux fous de douleur. D'où son nom savant : *Hippomane* (du grec « *hippos* », cheval et « *mania* », fureur) *mancenilla* (de l'espagnol *manzanilla*, petite pomme). Ses fruits verts appétissants ont encore intoxiqué « *97 personnes entre janvier 2007 et décembre 2017, selon un recensement des Centres antipoison mené aux Antilles françaises mais aussi à Saint-Martin et Sainte-Lucie* », ▶

YANN AVRIL/BIOSPHOTO - NATURIMAGE

Cytise faux ébénier

(Laburnum anagyroides)

Hauteur : 3 à 6 mètres
Localisation : France, sols calcaires. Fleurs et graines contiennent de la cytisine, un alcaloïde très toxique.

ALCALOÏDE

En France, gare au cytise

Il faut aussi se méfier des arbres de son jardin ou du bout du chemin. Exemple avec le cytise faux ébénier (*Laburnum anagyroides*). Toute la plante mais surtout les fleurs et les graines contiennent de la cytisine, un alcaloïde très toxique, qui se rapproche par son action de la strychnine. Quelques heures après l'ingestion des fleurs surviennent des nausées, vomissements, diarrhées et une altération de l'état général. Les graines provoquent en outre des convulsions, des sueurs, puis une détresse cardio-respiratoire pouvant entraîner la mort. Les gousses de cytise ressemblent un peu à des haricots jaunes, poussant parfois les enfants à les récolter pour jouer à la dînette. Pour s'informer, on peut se rendre sur toxiplante.fr, un site tenu par des pharmaciens ou encore sur lesherbonautes.mnhn.fr, l'herbier numérique collaboratif citoyen.

selon Denis Boucaud-Maître, du CHU de Guadeloupe. Mieux vaut donc lire les pancartes d'avertissement si l'on veut éviter des lésions labiales érosives, une irritation de l'oropharynx (carrefour entre les voies aériennes et digestives), des douleurs abdominales, des vomissements ou encore des diarrhées. « *Une trachéotomie* [accès direct à la trachée] *est souvent nécessaire lorsque la muqueuse buccale est trop altérée et accompagnée d'œdèmes importants* », explique la pharmacologue Véronique Nathou, qui a réalisé sa thèse sur la toxicité du mancenillier en 2019, à l'université de Poitiers. La chair brûlante de son fruit qui ressemble à une petite pomme dissuade heureusement d'en abuser.

D'ailleurs, mieux vaut ne pas y toucher : toutes les parties du mancenillier sont toxiques ! Une fois coupées, feuilles et branches exsudent un latex caustique et irritant qui brûle la peau et la cornée, de façon parfois irréversible. Il est même déconseillé de s'y abriter en cas de pluie, car cette dernière fait dégouliner la sève qui a pu suinter ici et là. La toxicité du « figuier vénéneux » ou « pomme zombi » est connue depuis des millénaires des populations autochtones : « *les Indiens Caraïbes, qui ont donné leur nom à la région, enduisaient leurs flèches de ce suc ou se servaient des feuilles pour empoisonner l'eau de leurs ennemis* », rappelle le pharmacien Jean-Louis Longuefosse, du centre hospitalier de Fort-de-France (Martinique). Les chercheurs ont établi que ce sont des diterpènes, des hydrocarbures produits par de nombreuses plantes pour leur défense, qui sont à l'origine du pouvoir toxique de l'arbre. Seul l'iguane peut croquer ses pommes en toute tranquillité. « *Malgré une politique d'éradication mise en place dès le XVII^e siècle, le mancenillier est encore présent sur de nombreuses plages caribéennes* », précise Véronique Nathou. Et il y est utile ! Il sert de rempart contre l'érosion, agissant comme un coupe-vent dont les racines stabilisent le sable.

Des graines disséminées à la vitesse de 50 km/h

Un autre arbre à poison de la famille des euphorbiacées est quant à lui devenu... un « arbre à poissons » ! Le suc laiteux de *Hura crepitans*, originaire des forêts humides américaines, a servi à fabriquer des flèches empoisonnées mais aussi à pêcher : quelques gouttes dans l'eau paralysent momentanément les proies. « Le pet du diable » comme on le surnomme, n'en reste pas moins l'un des arbres les plus dangereux au monde. Nul singe ne peut y grimper, car il est hérissé d'épines aux sucs vénéneux. Quant à ses graines, « *elles contiennent une huile purgative, des tanins et une toxialbumine qui inhibe la synthèse des protéines, produisant de graves effets cytotoxiques dans plusieurs organes,* résume Pierre Aubry, professeur de médecine tropicale du service de santé des armées. *L'ingestion de 2 à 3 graines provoque des troubles digestifs. En cas d'intoxication plus sévère, apparaissent une tachycardie, des troubles de la vision, une confusion mentale et des convulsions qui peuvent précéder le décès.* »

Peu visité, ce grand solitaire a trouvé un moyen explosif pour disséminer ses graines : à maturité, ses fruits éclatent et projettent leurs graines aplaties jusqu'à 18,5 m, à une vitesse de 50 km/h ! De quoi mériter son surnom d'arbre bombardier. ■

Rachel Mulot

@RachelFleaux

MARIJAN MURAT / DPA / AFP

Les systèmes de freinage émettent des grains de fer, de barium, de chrome et de cuivre, tous toxiques.

Freins et pneus : alerte aux particules fines

Le freinage des véhicules et le frottement des pneus sur le bitume vont devenir les principales sources de particules fines. Une pollution émise aussi par les modèles électriques.

Alors que les moteurs thermiques sont pointés du doigt depuis des années comme les coupables des émissions de particules fines émises par les automobiles, un rapport de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE) livre une conclusion surprenante : l'usure des freins, des pneus et des routes émettra plus de particules fines que la combustion incomplète des carburants. « *Avec les progrès effectués pour abaisser les émissions à la sortie de l'échappement, la responsabilité de la combustion des moteurs thermiques baisse tandis que celle des frottements mécaniques des freins et des pneus augmente, si bien qu'elle devrait devenir prépondérante dès 2035* », résume Katherine Farrow, de la direction environnement de l'OCDE.

La masse de ces particules émises hors échappement va globalement grimper de 53,5 % d'ici à 2030, passant de 850 000 tonnes aujourd'hui à 1,3 million de tonnes en 2030 si le trafic continue de croître sur les bases actuelles. L'intensité du phénomène varie selon le poids du véhicule, l'usage et les matériaux érodés, l'état de saleté de la route et le style de conduite (la plus agressive émettant le plus de particules). « *Les plaquettes de frein comprennent de très nombreux éléments comme les abrasifs, les liants, les lubrifiants, et les éléments de renforcement utilisant des composés organiques, des fibres minérales, du graphite, un mélange de composants métalliques, principalement de l'acier et du fer* », détaille Fulvio Amato, l'un des auteurs du rapport. Les particules émises sont principalement composées de fer, de barium, d'antimoine, de zinc, de chrome et de cuivre, des éléments toxiques pour l'humain, d'après les données obtenues principalement sur des bancs d'essai.

Imposer des normes drastiques d'émissions

Ces résultats obligent à revoir la place à accorder aux véhicules électriques en ville. Si ceux-ci n'émettent pas d'oxydes d'azote, ils utilisent les mêmes plaquettes de frein et les mêmes pneus que les voitures thermiques. Plus lourds à cause des batteries, ils pourraient même éroder davantage les freins. « *Un véhicule électrique ayant des batteries pour assurer une autonomie de 300 kilomètres ne réduit les PM10* [particule de moins de 10 micromètres de diamètre] *que de 4 à 7 % et augmente les PM2,5* [moins de 2,5 µm] *de 3 à 8 % par rapport à une voiture à moteur thermique* », prévient Fulvio Amato. En conséquence, estiment les auteurs, une mutation importante du parc automobile du pétrole vers l'électricité n'aurait qu'un effet marginal sur la réduction de la pollution aux particules. L'OCDE fait donc quelques propositions. La première, la plus efficace, consiste à continuer de réduire plus fortement l'utilisation de la voiture en ville en faisant payer les distances parcourues, en améliorant l'offre de transports en commun, et en promouvant le vélo et la marche. L'autre solution consiste à inciter à la recherche de matériaux plus résistants pour les freins et pneus qui émettent moins voire plus du tout de particules en imposant des normes drastiques d'émissions comme cela a été le cas pour les moteurs thermiques. ■

Loïc Chauveau
@Loïc_Chauveau

Cinq ans après la COP21, les défis restent immenses

L'accord de Paris a établi en 2015 un cadre juridique et des règles pour l'action des États, mais les émissions de gaz à effet de serre continuent de grimper à un rythme soutenu.

L'accord de Paris n'a encore rien résolu

Le 12 décembre 2015, l'accord de Paris, conclu à l'issue de la COP21, engageait les 195 États signataires à diminuer leurs émissions de gaz à effet de serre pour contenir la hausse de la température de la planète en dessous de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels. Las ! depuis, les émissions mondiales de gaz à effet de serre ont continué de grimper de 1,3 % par an en moyenne. 2019 constitue même un record absolu avec près de 60 milliards de tonnes de CO_2 émises par l'activité humaine. Pour rester sous les 1,5 °C, il faudrait que la consommation de pétrole, de gaz et de charbon diminue de 6 % par an jusqu'en 2030.

La boîte à outils est pourtant prête

En cinq ans, les négociateurs de l'accord ont établi un cadre juridique et des règles pour leur action. La mesure des émissions se fera à partir de 2023 selon des techniques communes (capteurs, exploitation des statistiques nationales, évaluation des puits de carbone comme les forêts) avec de la flexibilité pour les pays les plus pauvres sans capacités techniques. Chaque État sera informé par l'ONU des objectifs que s'assignent les autres pays et des progrès accomplis par les politiques nationales. L'exercice sera également répété tous les cinq ans à partir de 2025. Reste à s'entendre sur l'organisation d'un marché mondial du carbone concernant aujourd'hui seulement les États les plus riches sous l'égide du protocole de Kyoto. C'est l'objectif de la COP26 qui aura lieu à Glasgow (Royaume-Uni) en novembre.

JULIAN STRATENSCHULTE / DPA / AFP

Les pays n'investissent pas assez dans les énergies renouvelables pour diminuer les gaz à effet de serre (ici une centrale à charbon à Merhum, Allemagne).

Les États ne respectent pas leurs engagements

Les États avaient jusqu'au 31 décembre 2020 pour indiquer leur engagement de réduction pour 2030. Selon le World Research Institute, 68 pays sur 195 l'ont effectivement fait mais ils ne représentent que 8 % des émissions mondiales. Les États-Unis, la Chine, la Russie, l'Union européenne n'en font pas partie. Les engagements à plus long terme posent moins de problèmes : 126 pays représentant la moitié des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) se sont engagés à être neutres en la matière en 2050. C'est le cas de l'Union européenne, du Royaume-Uni, du Canada, du Japon ou de la Corée du Sud. La Chine a annoncé vouloir atteindre cet objectif en 2060.

La France est très en retard

Entre 2015 et 2018, la stratégie française bas carbone prévoyait une réduction de 9 % des émissions de gaz à effet de serre. Malheureusement, la baisse n'a été que de 1,1 %, soit 62 millions de tonnes émises en excès. Les transports et l'habitat en sont les principaux responsables.

Collectivités et entreprises agissent enfin

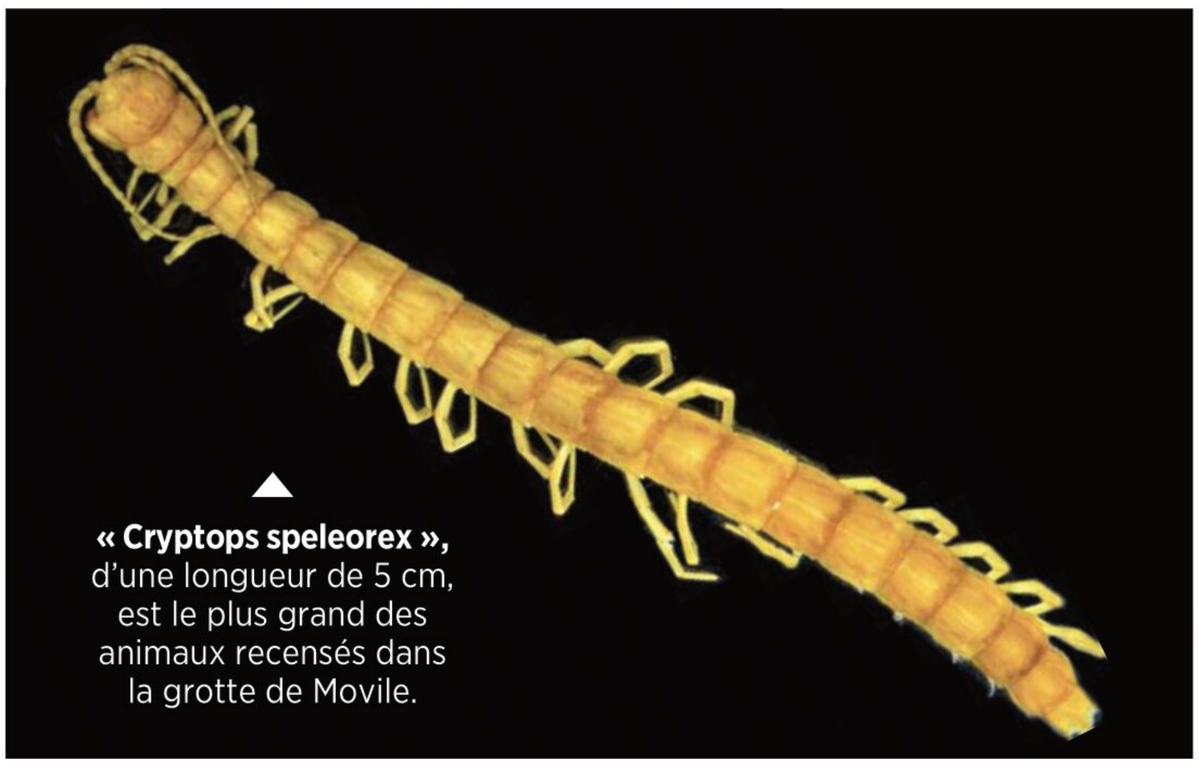
Plus de 18 000 « acteurs non étatiques » ont engagé des actions visant à atteindre la neutralité carbone en 2050. 300 entreprises multinationales ont rejoint le *« business ambition for 1,5 °C »*. Une cinquantaine de banques publiques comme privées et de fonds d'investissement ont rejoint le *« climate action in financial institutions »* qui se donne pour objectif de bannir tous les investissements dans les énergies fossiles. ■

Loïc Chauveau

@Loic_Chauveau

Ce mille-pattes vit en enfer

Il a réussi à survivre dans une grotte de Roumanie coupée du monde pendant 5,5 millions d'années.



▲ **« Cryptops speleorex »,** d'une longueur de 5 cm, est le plus grand des animaux recensés dans la grotte de Movile.

VARPU VAHTERA, ET AL.

En apparence, ce mille-pattes découvert dans une grotte roumaine ressemble à son homologue vivant en surface, *Cryptops anomalans*. Taille similaire, environ 5 cm, même coloration jaune. Mais, génétiquement, les deux myriapodes sont pourtant très différents apprend-on dans le dernier numéro de la revue *Zookeys*. Et pour cause, *Cryptops speleorex* vit dans l'un des lieux les moins accueillants de la planète et il a bien fallu qu'il s'adapte...

Découverte en 1986 par des ouvriers cherchant des emplacements pour une future centrale nucléaire, la grotte de Movile est demeurée totalement étanche au monde extérieur, et a évolué ainsi en autarcie durant... 5,5 millions d'années ! Pauvreté en oxygène, obscurité totale, taux de soufre, de méthane, d'ammoniac et de dioxyde de carbone infernaux, 100 % d'humidité, c'est l'un des lieux terrestres les plus atypiques et inhospitaliers qui soit. Pourtant, la vie y pullule, se développant dans un écosystème unique à base de méthane et de soufre produits par les bactéries locales. Formant un voile à la surface de l'eau, celles-ci synthétisent des molécules nourricières à partir du dioxyde de carbone et de l'eau. Les bactéries nourrissent ainsi des petits herbivores, des vers et des crustacés, qui seront à leur tour mangés par des carnivores plus gros, comme les araignées ou les mille-pattes.

Au dernier recensement, la caverne hébergeait 51 espèces d'invertébrés dont 34 sont endémiques et n'existent donc nulle part ailleurs. Dernier hôte en date : ce mille-pattes qui se révèle être le plus grand des animaux de la grotte. L'analyse génétique conduite par Nesrine Akkari, du muséum d'Histoire naturelle de Vienne (Autriche), et ses collègues permet de conclure que cette scolopendre a évolué séparément de son homologue terrestre durant plusieurs millions d'années, pour aboutir à une nouvelle espèce plus adaptée à une vie cavernicole. ■ **Hervé Ratel**

PAR CÉLINE GUIVARCH *
CHRONIQUE COÉCRITE AVEC CHRISTOPHE CASSOU**

Quand l'enneigement diminue d'année en année

La variabilité naturelle des conditions météorologiques conditionne l'alternance entre années à fort enneigement et années de disette de neige. Pourtant, à cette variabilité interannuelle, se superpose depuis plusieurs décennies une baisse sans équivoque de l'enneigement en basse et moyenne altitude où fluctue la limite pluie-neige. Au col de Porte, à 1325 m d'altitude dans les Alpes, la hauteur moyenne de neige a baissé de 30 à 40 % en trente ans. Le stock nival a diminué de 12 % en moyenne sur les massifs français, du fait de moindres précipitations neigeuses et d'une fonte précoce en lien avec un réchauffement d'environ 1 °C en cinquante ans à 1500 m. Cette baisse tendancielle de l'enneigement moyen est attribuable aux effets anthropiques ; elle est irréversible pour les deux ou trois prochaines décennies en raison des gaz à effet de serre (GES) déjà accumulés dans l'atmosphère. Dans les Alpes comme dans les Pyrénées, le déclin de la neige constitue une menace pour le tourisme, puisque environ 25 % des stations de ski pourraient ne plus avoir un enneigement suffisant pour les loisirs d'hiver vers 2040. À mesure que glaciers et stocks neigeux s'amenuisent, rivières et fleuves alimentés par leur fonte saisonnière voient leurs débits d'étiage atteints plus tôt, ce qui a des répercussions sur de nombreux secteurs comme l'agriculture et la production d'énergie hydroélectrique et nucléaire (refroidissement des réacteurs. Le débit d'étiage de la Garonne a déjà diminué de 20 % en trente ans, ce qui est aussi lié à l'évaporation accrue due au réchauffement. À court terme, les activités devront évoluer pour s'adapter. À plus long terme, seule la réduction rapide des émissions de GES mondiales est à même de préserver l'identité culturelle des montagnes. ■

> « Seule la réduction rapide des émissions de gaz à effet de serre pourra préserver l'identité culturelle des montagnes »

* Directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3, elle vient par ailleurs d'obtenir le prestigieux prix Irène Joliot-Curie de la jeune femme scientifique.
** Directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec, groupe 1.

A. BILLET

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

Prédire les crises d'épilepsie

Des neurologues français étudient le lien entre cette hyperactivité neuronale soudaine et le rythme cardiaque. Leur objectif : développer un patch qui alerterait en cas de dysfonctionnement et permettrait au patient de se protéger pour éviter une chute.

Par Sylvie Riou-Milliot

ELLE EST IMPRÉVISIBLE. Elle, c'est la crise d'épilepsie, une tempête électrique cérébrale. Soit la traduction encore mal comprise d'une hyperactivité soudaine d'un groupe de neurones qui se mettent brutalement à communiquer entre eux. Les scientifiques peinent toujours à décrypter ce dialogue qui produit une angoisse permanente chez 30 % des patients non soulagés par les traitements. Car il est impossible de prédire l'apparition des crises, nul ne sachant encore pourquoi telle région cérébrale s'emballe et propage son excitation au reste du cerveau. Face à tant d'inconnues, les spécialistes de la maladie ont ouvert une nouvelle voie de recherche : tenter de détecter ces dysfonctionnements, quelques minutes au plus tard avant qu'ils ne surviennent, pour que le patient ait le temps de se mettre dans un environnement sécurisé afin d'éviter la chute, parfois gravissime. C'est notamment la piste suivie par des neurologues d'un établissement unique en France, le centre médical de la Teppe, à Tain-l'Hermitage (Drôme), où ils étudient particulièrement le lien entre ces crises et le rythme cardiaque. Leur objectif est de parvenir à mettre au point un patch qui alerterait en cas de dysfonctionnement. Des essais sont en cours.

LA TEPPE

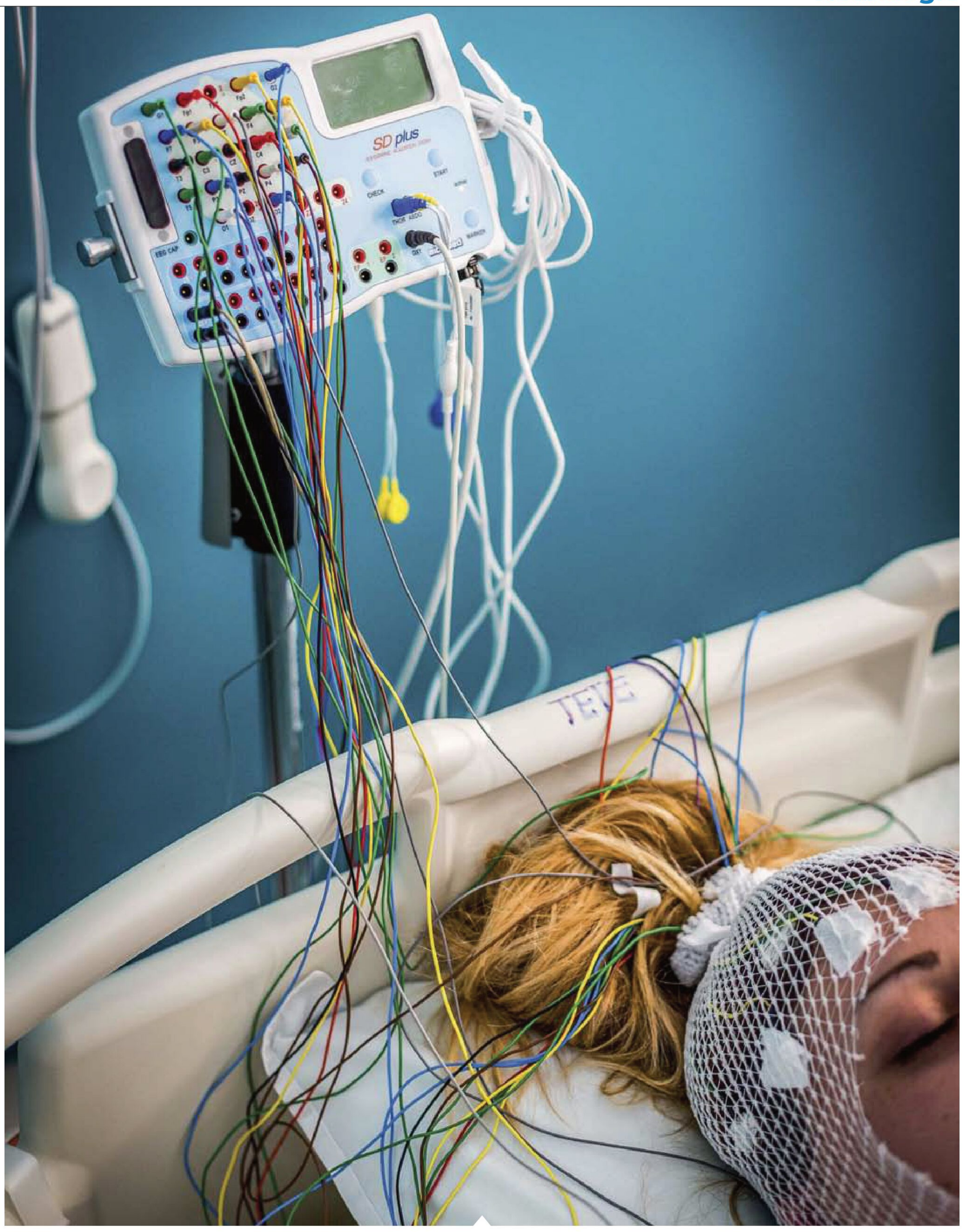
Le patch Detec Teppe, fondé sur l'intelligence artificielle, pourrait permettre de détecter en temps réel les variations de la fréquence cardiaque annonçant une crise.

Le principal écueil à la détection des crises est leur extrême diversité. Elles sont en effet très différentes selon l'âge et le contexte de leur survenue, certaines pouvant être d'origine génétique, d'autres métabolique ou encore tumorale... Si elles sont toujours identiques chez un même patient, elles varient de l'un à l'autre, les signes cliniques extérieurs dépendant de la zone cérébrale « allumée » en premier : diurnes ou nocturnes ; généralisées (tout le cerveau s'embrase) ou focales (une seule zone est concernée) ; avec ou sans perte de conscience... Ainsi, dans sa forme la plus discrète, l'épilepsie peut se caractériser par une très légère « absence » momentanée au cours de laquelle le regard — en particulier celui des enfants — se perd dans le vide. Mais dans ses formes graves, elle ▶

PROBABILITÉS

Une « météo » cérébrale

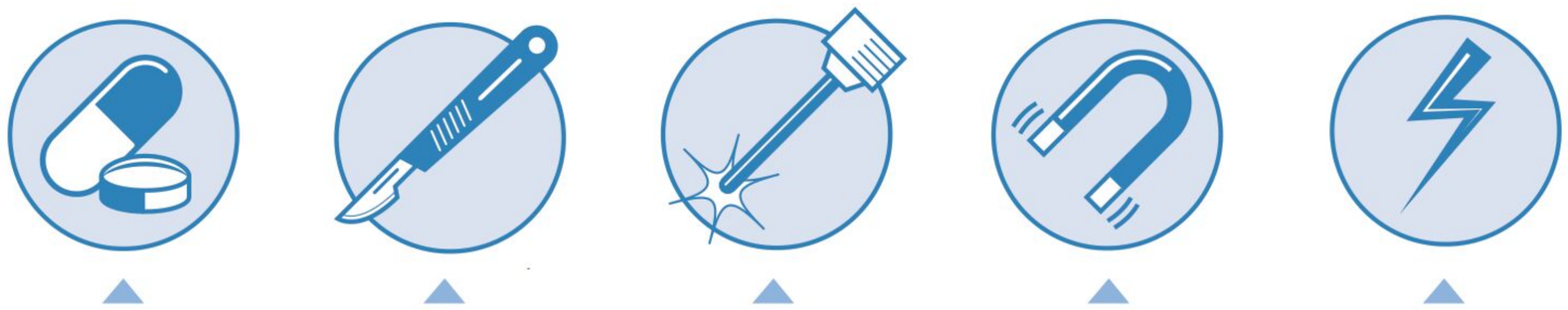
Selon un travail paru mi-décembre 2020 dans la revue *Lancet Neurology*, des chercheurs suisses (universités de Genève et Berne) et américains (universités de San Francisco et Providence) sont parvenus, en utilisant des électrodes implantées en permanence dans le cerveau ainsi que des modélisations mathématiques des crises, à prévoir des « fronts de probabilités » de leur survenue plusieurs jours à l'avance, un peu comme les météorologistes prévoient les orages. Prochaine étape : développer un appareil moins invasif et portable pour les patients afin de reproduire ces prévisions de manière prospective. Des essais cliniques sont également prévus.



GARO/PHANIE

L'enregistrement par électroencéphalographie de l'activité cérébrale 24 h/24, associé à l'IRM, permet dans certains cas d'identifier la zone épileptogène ouvrant la voie à une intervention chirurgicale.

Les cinq traitements disponibles



MÉDICAMENTS
Ils régulent l'activité de certaines zones du cerveau. La régularité de leur prise est essentielle.

CHIRURGIE
Il s'agit de retirer la zone cérébrale dite épileptogène.

RAYONS GAMMA OU LASER
La même zone du cerveau peut être détruite soit par rayons gamma ou la chaleur d'un laser.

NEURO-STIMULATION
Elle s'effectue soit par le recours à la stimulation magnétique transcrânienne (aimant) ou en stimulant le nerf vague.

STIMULATION TRANS-CRÂNIENNE
Un traitement au stade de la recherche, avec l'application de faibles champs électriques à la surface du cortex.

BRUNO BOURGEOIS

peut se manifester par l'exécution de gestes répétitifs saccadés ou par une brutale et impressionnante perte de conscience accompagnée de cri et de convulsions généralisées de l'ensemble du corps. « *Pour anticiper la crise, il faudrait parvenir à identifier précisément les neurones chefs d'orchestre* », souligne le Pr Vincent Navarro, de l'Institut du cerveau et de la moelle épinière (ICM) à Paris, qui a fait de ce thème l'axe de ses recherches. Des travaux dont les résultats sont d'autant plus attendus que certains patients peuvent parfois faire plusieurs crises dans une même journée. Ce sont ces derniers qui sont particulièrement suivis dans le centre médical de la Teppe.

À la fois centre d'accueil, de soins et de vie, l'établissement reçoit près de 500 adultes atteints de formes graves où ils sont pris en charge par environ 500 soignants (médecins, éducateurs, assistants sociaux...). Dans l'un des bâtiments, la clinique de neurologie abrite ainsi une quinzaine de chambres individuelles, toutes équipées de caméras vidéo et d'électroencéphalographes enregistrant 24 h/24 l'activité électrique du cerveau grâce à des électrodes directement posées sur le cuir chevelu. Pour chaque patient, les vidéos sont automatiquement couplées à l'analyse des électroencéphalogrammes. Ceux-ci, amples et désordonnés lors des crises, sont le reflet de l'activité interne du cerveau. Ils sont ensuite couplés à l'imagerie par résonance magnétique (IRM), ce qui permet aux médecins, dans environ la moitié des cas d'épilepsies rebelles aux médicaments, d'identifier une zone dite épileptogène, celle d'où part le signal électrique (un potentiel d'action) se propageant de neurone en neurone. « *Si cette zone est accessible à la chirurgie, sans risque de lésion d'autres régions essentielles comme celle du langage ou de la vision, un geste chirurgical, efficace dans 60 % des cas, pourra être programmé* », précise le Dr Patrick Latour, responsable de l'unité de recherche clinique à la Teppe.

600 000
personnes
environ souffrent en France d'épilepsie. Près de la moitié d'entre elles ont moins de 20 ans.

Un casque inconfortable et stigmatisant

Mais, dans les autres cas, c'est l'impasse. Comme pour tous ceux qui, dans le parc de l'établissement, ne sortent jamais sans un accompagnateur ou sans porter un épais casque de mousse destiné à amortir les chocs en cas de chute. Inconfortable, chaud, pour le moins stigmatisant, au point que certains préfèrent parfois un fauteuil. Ceux qui se résignent à s'en coiffer rêvent de s'en affranchir. « *Malheureusement, aucun des dispositifs existants n'a réellement démontré une précision parfaite dans la détection des crises mais la demande des patients reste très forte* », explique le Dr Jérôme Petit, neurologue à la Teppe.

Ni les capteurs de mouvements à glisser sous le matelas (Afevi), ni les bracelets, montres ou encore tee-shirts munis d'accéléromètres (Fitbit, Epi, Apple Watch, Neuronaute) ne répondent totalement aux attentes. D'où l'idée de Patrick Latour qui a lancé il y a quelques mois le projet Detec Teppe fondé sur l'intelligence artificielle (IA), en association avec des ingénieurs et data-scientifiques de l'association Aura et de psychologues de l'université de Grenoble-Alpes. « *Il s'agit d'un patch connecté fondé sur la surveillance en temps réel de la fréquence*

OBSTÉTRIQUE

Grossesse sous haute surveillance

Chaque année en France, environ 2500 femmes atteintes d'épilepsie mènent à terme une grossesse, sans changement de la fréquence de leurs crises. Considérées comme « à risque » par le corps médical, ces grossesses nécessitent un suivi médical étroit pour réduire le nombre de médicaments absorbés par la future mère. Rappelons que la Dépakine (valproate de sodium, laboratoires Sanofi), mise sur le marché en France en 1967, est au cœur d'un scandale sanitaire qui concerne environ 30 000 victimes en France. Utilisé pendant la grossesse, cet anti-épileptique a entraîné des malformations congénitales ainsi que des troubles du développement (intellectuel, comportemental...) chez l'enfant. Bien que connus de longue date, ces risques n'avaient pas été mentionnés sur les notices. Selon un avis de 2019 de l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM), d'autres antiépileptiques tels l'Epitomax (topiramate) et le Lyrica (prégabaline) sont aussi à éviter en cas de grossesse. Heureusement, des alternatives (lamotrigine, lévétiracétam, oxcarbazépine) existent.

MATHIEU GOLINVAUX

Des programmes visent à entraîner des chiens à détecter les signes avant-coureurs d'une crise d'épilepsie. Ainsi, le golden retriever Gaïa, formé en Belgique, aboie ou gémit quinze minutes à une heure avant que sa maîtresse ne soit prise de convulsions.

cardiaque », explique le neurologue. Qui poursuit : « *L'analyse de la littérature a montré que dans environ 70 % des cas, ce paramètre présente de très nombreuses variations dans les heures qui précèdent la crise. Chez certains patients, le cœur peut même s'emballer très vite et multiplier sa fréquence par deux en passant de 60 battements par minute à 120 en une dizaine de secondes.* » Les scientifiques commencent aussi à s'apercevoir que les modifications de rythme cardiaque n'apparaissent pas seulement juste avant la crise mais aussi entre les crises. Depuis quelques mois, la dizaine de participants au projet inscrit dans une démarche dite d'Open Science — c'est-à-dire de partage des données entre chercheurs et médecins — espère développer un dispositif le plus précis possible à un prix abordable. « *Nous travaillons à construire ensemble les bases de données et affiner les modèles d'apprentissage d'IA pour définir la méthode la plus prédictive* », précise Clément Le Couedic, président de l'association Aura. L'application, personnalisée, serait capable d'établir chaque jour sur smartphone une « météo de crise » en fonction des signaux biologiques. Les jours « verts », les sorties seraient possibles, les « rouges » la prudence serait de mise. « *Notre établissement est un living-lab unique en France*, poursuit le Dr Patrick Latour. *Nous cherchons aussi à tester l'adhésion psychologique des patients à ce patch* » dont le prototype devrait être évalué d'ici à plusieurs mois. En attendant, d'autres pistes de recherche sont explorées, comme celle de Vincent Navarro, à l'ICM, unique en France : l'implantation en intracérébral — et non plus en surface — d'électrodes, au niveau d'un seul et unique neurone. « *Nous utilisons des microélectrodes de 40 micromètres de diamètre pour étudier le plus précisément possible comment l'activité électrique y naît et se propage* », précise-t-il. Menés sur environ 70 patients, ces travaux visent à « *parvenir un jour à empêcher la crise de se propager en la bloquant de manière pharmacologique* », dévoile le scientifique. Un espoir partagé par des millions d'épileptiques dans le monde. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

Fondation française pour la recherche sur l'épilepsie
www.fondation-epilepsie.fr

Ligue française contre l'épilepsie
www.epilepsie-info.fr

Épilepsie France
www.epilepsie-france.fr

APHP

« Pour anticiper la crise, il faudrait parvenir à identifier précisément les neurones chefs d'orchestre »

Vincent Navarro, neurologue à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière (ICM), à Paris

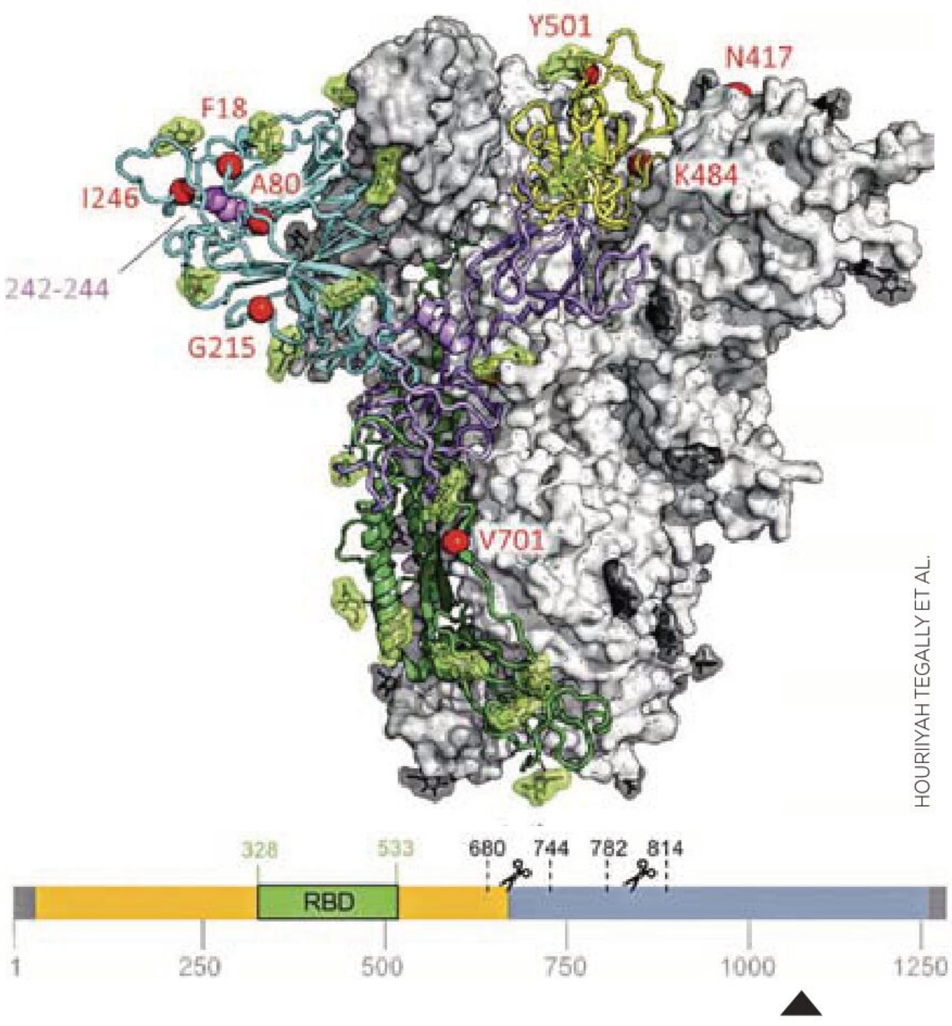
Comment lutter contre les variants du coronavirus

La découverte de deux variants du Sras-CoV-2, en Grande-Bretagne et en Afrique du Sud, fait craindre une propagation encore plus rapide du virus. Face à cette menace, plusieurs pays adaptent leur stratégie vaccinale.

UN AN APRÈS le premier séquençage, si la maladie Covid-19 reste la même, le virus a beaucoup évolué. Voilà l'enseignement que l'on peut tirer des 350 000 séquences génétiques d'échantillons viraux réalisées dans le monde (pour quelque 100 millions de cas de Covid-19 confirmés) et recensées sur la plate-forme de partage internationale des données de génomique virale GISAID. La souche itiniale apparue à Wuhan, en Chine, à l'automne 2019 dans le clade (ou lignée) 19A *(en violet sur l'infographie p. 75)* s'est presque effacée au profit d'une riche descendance. Soit 11 lignées retracées sur un arbre phylogénétique, sorte de généalogie des infections, où chaque point représente un échantillon séquencé. Ces lignées divergent génétiquement et sont caractérisées en fonction du nombre et du type de mutations acquises lors de la circulation du coronavirus. Ces variations ont été presque sans conséquence sur l'épidémie jusqu'aux alertes lancées en décembre 2020 après la découverte de deux variants, l'un dans le sud de l'Angleterre *(en rouge)*, l'autre en Afrique du Sud *(orange foncé)*, qui semblent changer la donne.

Pour comprendre, il faut voir chaque particule du Sras-CoV-2 comme un petit livre composé d'environ 29 900 lettres, uniquement des A, C, G et U. Placées dans un ordre précis, elles composent un bout de code génétique sous forme de brin d'ARN. En tout, 15 gènes formés de centaines de lettres produisant chacun les 15 protéines qui donnent son épaisseur à la particule virale : une centaine de nanomètres à peine. Lorsque celle-ci se réplique par milliards en infectant une cellule, elle copie son code de 29 900 lettres pour chacune de ses descendantes... Et commet fatalement des erreurs que l'on nomme mutations. Près de 15 000 d'entre elles ont été décrites jusqu'ici, mais seules quelques-unes s'inscrivent durablement, se transmettant au fil des contaminations créant ainsi des lignées nouvelles. Sans que les chercheurs sachent exactement pourquoi.

L'exemple du variant sud-africain



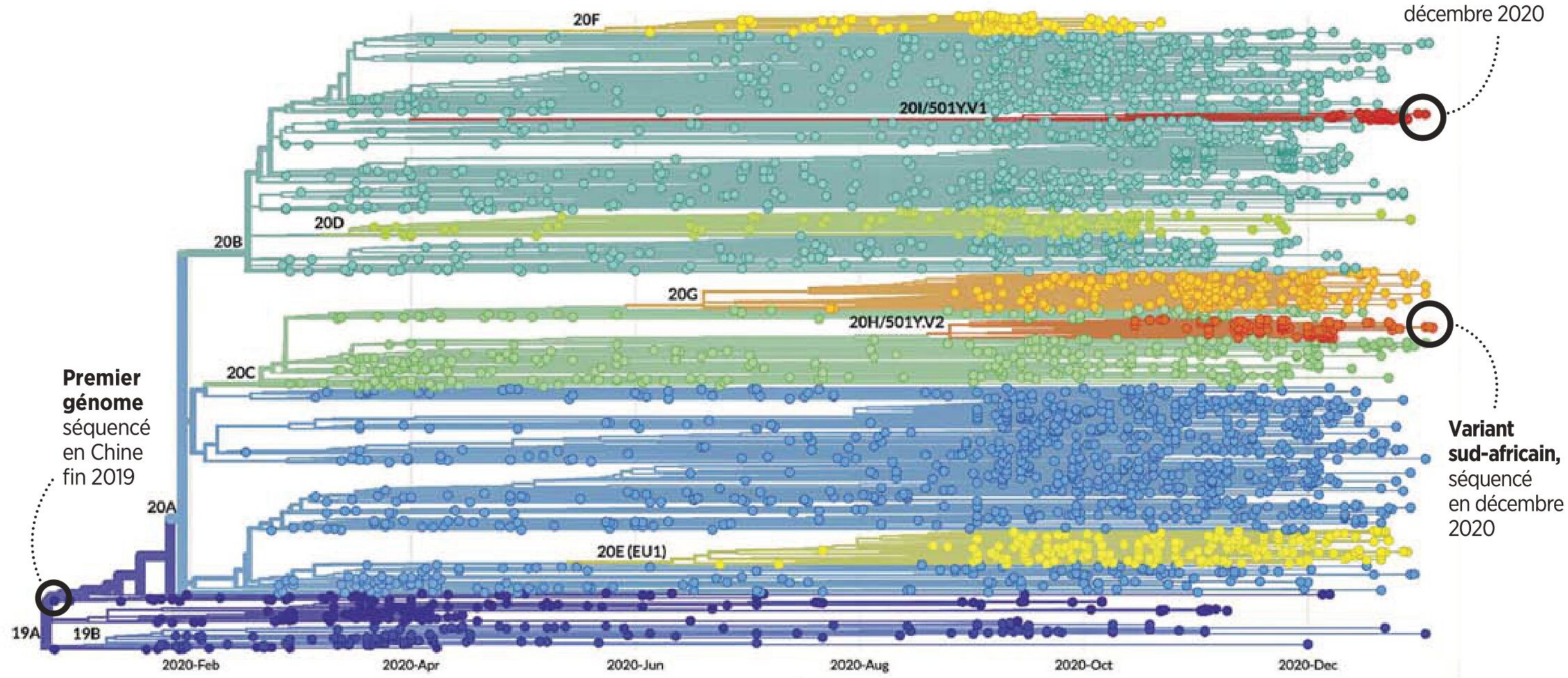
Les huit modifications (en rouge) de la protéine Spike sont dues à une mutation d'un gène du coronavirus Sras-Cov-2. Trois d'entre elles sont plus préoccupantes (Y501, N417, K484) car elles peuvent changer la façon qu'a le coronavirus de s'accrocher aux cellules humaines, ce qui pourrait avoir une incidence sur l'efficacité des vaccins.

Les lignées dites sud-africaine (501Y.V2, *en orange* sur les graphiques p. 75) et britannique (501Y.V1, *en rouge*) sont issues de clades différents. Mais elles ont fixé une même mutation (N501Y) sur le gène qui code la protéine Spike du virus, ces petites antennes (spicules) qui lui donnent son allure de couronne d'épines. Dans le livret du Sras-CoV-2, cela se situe sur la 501e lettre du génome qui correspond à une région de la protéine appelée « domaine de liaison au récepteur (RBD) » ACE2 *(voir ci-contre)* ; c'est-à-dire la partie du spicule qui permet au virus de s'accrocher aux cellules saines présentant le récepteur ACE2.

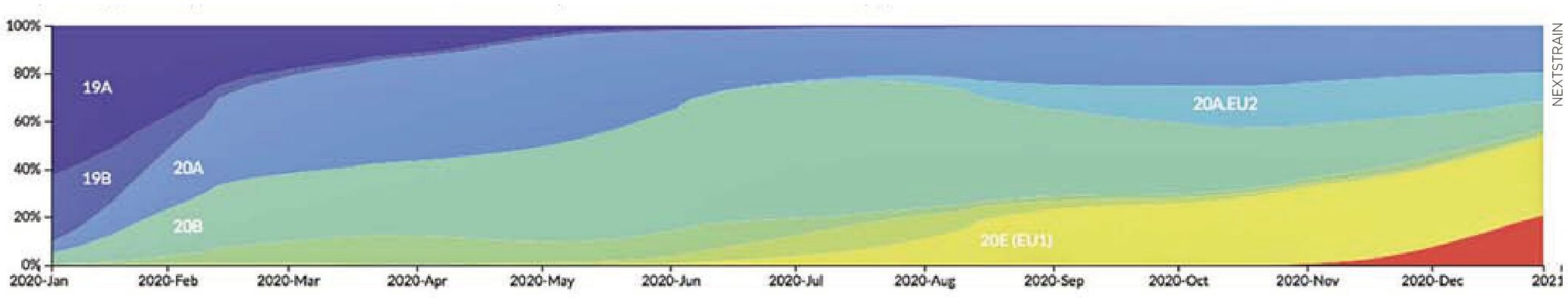
Une charge virale 3 à 4 fois plus élevée

De quoi le rendre plus contagieux encore ? Tout pointe en ce sens d'après les premières observations, avec une augmentation de la transmissibilité estimée entre 50 % et 70 % par l'Imperial College de Londres (Royaume-Uni) fin décembre 2020. Si ce genre d'estimation est difficile à assurer, de fait, les indices s'accumulent : l'explosion de l'épidémie au Royaume-Uni a coïncidé avec

Arbre phylogénétique du virus Sras-CoV-2



Visualisation des différentes lignées virales du Sras-CoV-2 depuis le premier génome séquencé en Chine fin 2019 (premier point violet tout en bas à gauche) jusqu'aux nouveaux variants britannique (en rouge) et sud-africain (orange foncé). En tout, 10 lignées divergeant au fil du temps de la souche de Wuhan sont représentées ici (19A, 19B, 20A, 20B, etc.) grâce à un échantillonnage des génomes viraux séquencés dans le monde. Chaque point correspond à un échantillon.



À partir de l'analyse des données de génomique utilisées dans l'arbre phylogénétique (en haut), le graphique montre la prépondérance des différentes lignées virales au cours de la pandémie dans le monde. Celles d'origine (19A et B, en violet et bleu) ont laissé la place à celles de 2020 (20A, 20B, 20C...). Les lignées sud-africaine et britannique sont en augmentation constante (en rouge).

UCL

« Une seule mutation ne suffit pas à modifier la dynamique épidémiologique d'un virus. Il faut un certain agencement de différentes mutations »

François Balloux, directeur de l'Institut de génétique de l'University College de Londres (Royaume-Uni)

la prédominance croissante de ce variant depuis la mi-décembre ; deux études ont mesuré que les personnes infectées par ce variant présentent une charge virale trois à quatre fois plus élevée dans les voies respiratoires supérieures, les rendant de fait plus contagieuses par expectoration et, *in vitro*, la mutation N501Y semble faciliter l'accroche du virus au récepteur ACE2. *« Le suivi d'un million personnes exposées au virus entre novembre et décembre par Public Health England confirme lui aussi une vitesse de propagation de 10% à 70% plus élevée »*, ajoute Samuel Alizon, directeur de recherche CNRS, spécialiste de l'écologie évolutive et de la modélisation des maladies infectieuses. Or, fin décembre, les « graines » de ce variant étaient déjà semées dans plus de vingt pays : Austra-

O. HOCHSTRASSER/ISPM

DRE EMMA HODCROFT Épidémiologiste à l'université de Berne, en Suisse, et cofondatrice de la plate-forme Nextstrain *

« Les distinctions entre "variant" et "souche" sont importantes »

« Bien que les termes de "mutation", "variant", "souche" ou "lignée" soient souvent utilisés de façon interchangeable pour décrire l'épidémiologie du Sras-CoV-2, les distinctions sont importantes. La mutation se rapporte à un changement isolé de la séquence de base du virus. Les génomes qui diffèrent dans une séquence de base sont souvent appelés des variants. Mais ce terme est peu précis parce que deux variants peuvent différer par une ou plusieurs mutations. C'est le cas des "variants" britannique et sud-africain qui sont déjà des lignées. Enfin, on parle de souche à part entière lorsque la lignée présente un phénotype manifestement différent, que ce soit en matière de contagiosité, de virulence ou de différence antigénique, c'est-à-dire, modifiant suffisamment le pathogène pour qu'il échappe à une réponse immunitaire. »

*Outil collaboratif de visualisation de l'information des génomes viraux.

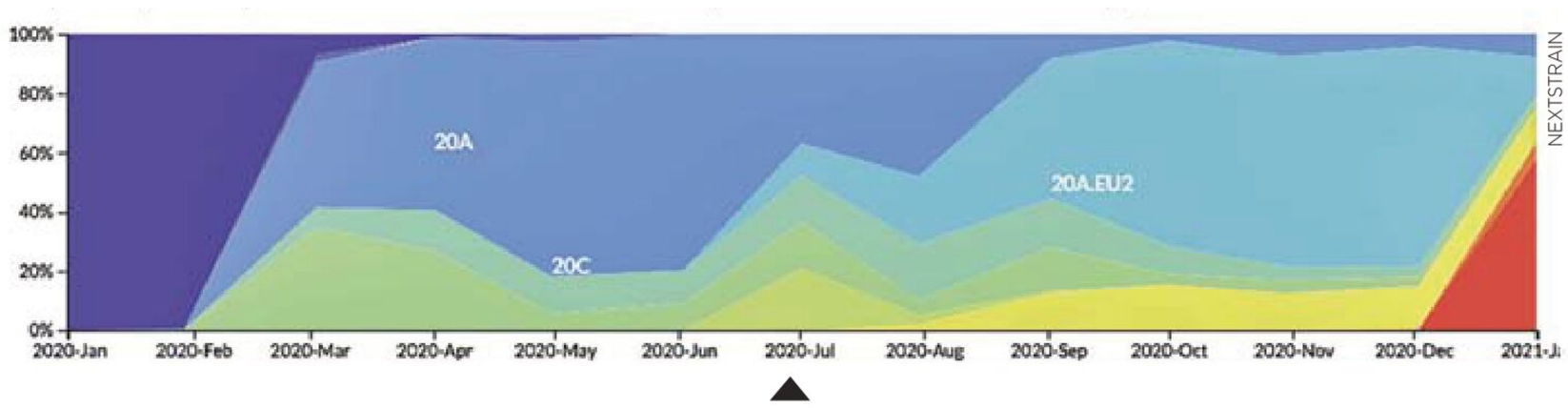
lie, Islande, Israël, Corée du Sud, États-Unis, Japon, Chili, Inde... et dans la plupart des pays européens, y compris en France où il circule déjà.

Quoi qu'il en soit, « *une seule mutation ne suffit pas à modifier la dynamique épidémiologique d'un virus, que ce soit pour le rendre plus contagieux ou provoquer une maladie plus sévère. Il faut un certain agencement de différentes mutations* », note François Balloux, directeur de l'Institut de génétique de l'University College de Londres. En l'occurrence, le variant britannique possède 23 mutations, dont neuf sur la seule protéine Spike (S). Celui identifié en Afrique du Sud en présente une dizaine, dont huit sur Spike, trois de ces dernières étant plus préoccupantes (N501Y, K417N et E484K) car elles interviennent sur la région RBD. Las ! on les retrouve dans un troisième variant détecté au Japon et un autre au Brésil, identifiés en janvier... Pour expliquer de telles accumulations de mutations, le Consortium britannique de la génomique du Covid-19 avance que le virus a pu évoluer chez des patients immunodéprimés. « *Chez ces derniers, l'infection peut prendre une forme chronique, mais qui dure plusieurs mois, au cours desquels le virus a le temps d'acquérir des mutations de façon graduelle* », explique Samuel Alizon. De telles évolutions longues, accumulant des mutations pour échapper aux anticorps de convalescents, ont déjà été observées chez des personnes souffrant de cancer et hébergeant le Sras-CoV-2 jusque durant six mois.

Ces mutations pourraient-elles permettre au virus d'échapper aux vaccins alors que commence la plus grande campagne de l'histoire ? En effet, qu'ils soient à ARN messager, à vecteur viral ou par virus inactivé, presque tous utilisent la protéine S comme modèle à présenter au système immunitaire (l'antigène) pour qu'il apprenne à s'en défendre. Problème : anticorps neutralisants et mémoire cellulaire se construisent à partir de régions spécifiques de la protéine S, les épitopes vaccinaux. De sorte que si le Sras-CoV-2 acquérait des mutations modifiant trop la structure de celle-ci, il pourrait finir par échapper génétiquement au vaccin. Reste que, par chance, les vaccins actuels provoquent une réponse immunitaire sur l'ensemble de la protéine S : il faudrait donc que celle-ci soit modifiée simultanément en plusieurs endroits clés pour leur échapper. Dans cette perspective, le laboratoire Pfizer a déjà assuré qu'il était en mesure de produire en trois semaines un nouvel ARN messager adapté, avec peu d'essais cliniques à refaire.

Le pari de vacciner plus vite et plus largement

« *Avant même l'émergence des lignées britannique et sud-africaine, il était clair qu'il faudrait réfléchir à redéfinir régulièrement les séquences dans le vaccin*, explique François Balloux. *Ça arrivera peut-être plus vite que prévu.* » D'autant que « *la campagne de vaccination va exercer une pression de sélection majeure sur le virus. Il devra s'adapter ou périr* », complète Samuel Alizon. Pour qu'un variant réussisse à contourner le vaccin, il faudrait qu'il acquière chez une personne non vaccinée des mutations lui conférant une très bonne adaptation chez une personne vaccinée. Ce qui est possible en théorie : sur le modèle d'un patient immunodéprimé, la tâche peut lui être facilitée par un vaccin trop peu efficace, ou protégeant bien de la maladie mais n'empêchant pas la transmission du virus, les vaccins à ARNm n'ayant pas fait toutes leurs preuves sur ce point. C'est dans ce contexte que le Royaume-Uni a fait le pari de vacciner plus vite et plus largement pour contrer la flambée épidé-



NEXTSTRAIN

Répartition des lignées virales ayant le plus circulé en France au cours de la pandémie. En rouge, apparaît la flambée du variant britannique à partir du mois de décembre 2020 (graphique établi le 14 janvier).

mique qu'il subit (trois millions de personnes déjà vaccinées mi-janvier). Pour ce faire, les autorités sanitaires ont choisi d'utiliser les doses réservées pour la deuxième injection afin de vacciner ainsi deux fois plus de gens. La seconde dose étant quant à elle décalée à douze semaines. Sauf qu'avec le vaccin Pfizer, la protection atteint 50 % douze jours environ après la première injection, et 95 % avec la deuxième injection quatre semaines plus tard. La stratégie britannique à trois mois implique donc que les personnes vaccinées ne seront protégées qu'à 50 %.

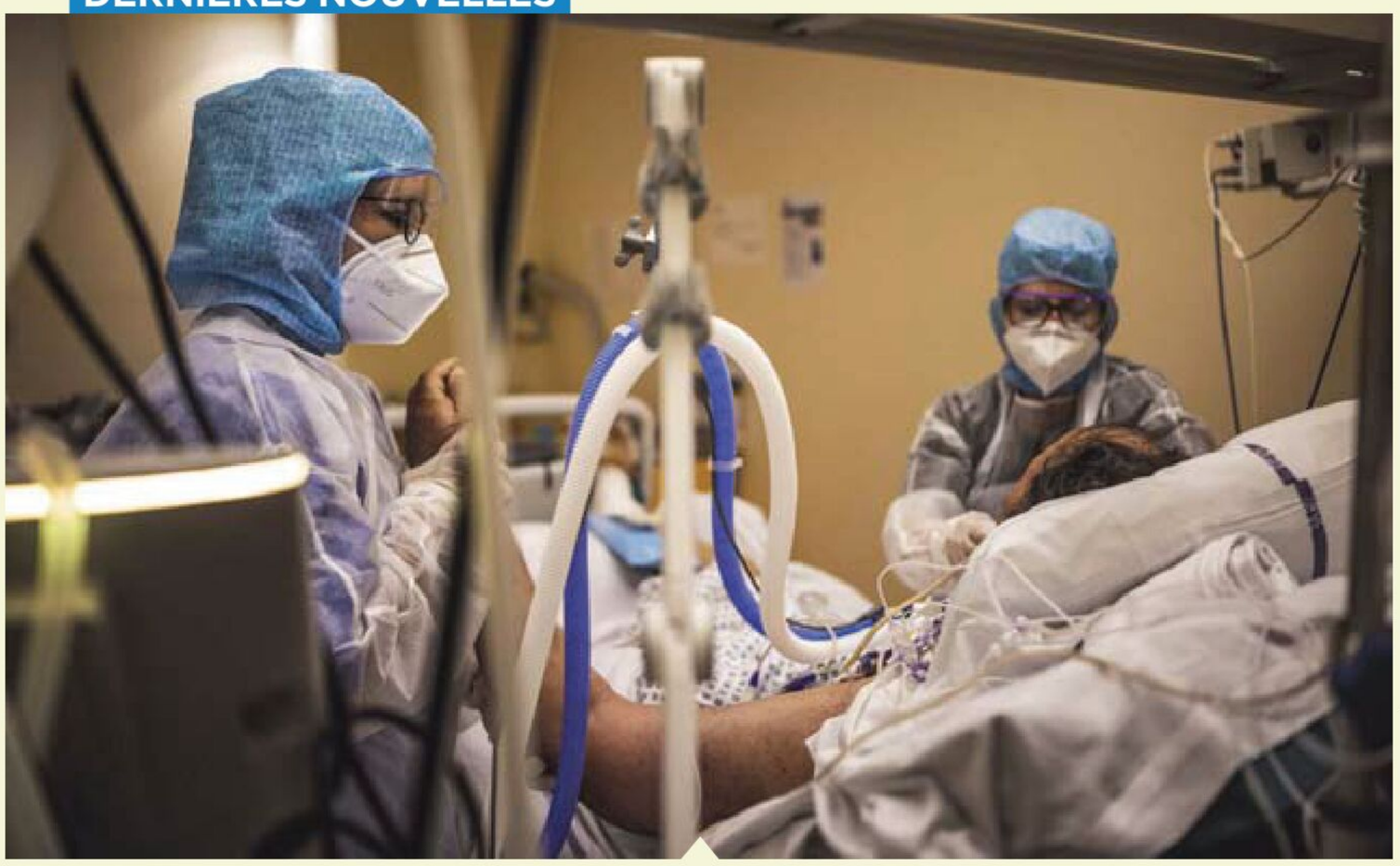
Donner la seconde dose le plus tôt possible

Une démarche qui n'est pas sans risque : « *Lorsque nous souhaitons générer des mutations d'échappement en laboratoire, nous soumettons le virus à une faible pression d'anticorps que nous augmentons lentement. Un peu comme après une première dose de vaccin* », fait remarquer Florian Krammer, professeur à l'Institut de microbiologie de l'Icahn School of Medicine at Mount Sinai, à New York (États-Unis). « *Il serait donc bon de donner la deuxième dose le plus tôt possible* », ajoute-t-il.

En France, le ministre de la Santé a déjà annoncé que la deuxième dose pourrait être repoussée à six semaines au lieu de trois si la situation l'exigeait. Quoi qu'il en soit, le Centre européen de contrôle et de prévention des maladies préconise désormais « *une surveillance étroite des personnes vaccinées [...] afin de déceler d'éventuels échecs de vaccination* » et appelle ainsi à séquencer et caractériser génétiquement ces cas de façon systématique. Heureusement, le pire n'est jamais certain, et la vaccination la plus large et la plus rapide possible est encore la meilleure option pour tout le monde à ce stade.

Hugo Jalinière @HugoJaliniere

DERNIÈRES NOUVELLES



FREDERIC DIDES/SIPA

Quelque 15 000 décès dus au Covid-19 et environ 2600 à la grippe ont été comptabilisés parmi les personnes hospitalisées pour ces affections au printemps 2020.

Trois fois plus de morts du Covid-19 que de la grippe dans les hôpitaux

Au printemps 2020, en France, le Covid-19 a été trois fois plus meurtrier que la grippe saisonnière sur la même période en 2019. Il s'agissait pourtant de la pire saison grippale des cinq dernières années. Au plus fort des deux épidémies, près de 90 000 cas de Covid-19 et 46 000 de grippe ont été hospitalisés en France pendant les périodes examinées. Parmi ceux-là, les chercheurs de l'Inserm ont évalué une mortalité de respectivement 16,9 % (environ 15 000 décès dus au Covid-19) et de 5,8 % (environ 2600 dus à la grippe).

SOURCE : LIONEL PIROTH, INSERM/ UNIVERSITÉ DE DIJON.

Le virus continue de se répliquer après le décès

Le Sras-CoV-2 peut se répliquer dans la gorge jusqu'à 35 heures après le décès. C'est ce qu'ont observé des chercheurs grâce à des prélèvements nasopharyngés réalisés sur le corps de patients décédés du Covid-19. Ils ont non seulement détecté la présence de l'ARN viral, mais ils ont pu montrer qu'il était à niveau constant, sans que la durée *post mortem* ne semble avoir d'influence sur le niveau de charge virale. Chez certains patients, le virus était bien actif dans ce laps de temps, démontrant le potentiel infectieux des corps lors de leur manipulation.

SOURCE : FABIAN HEINRICH, CENTRE MÉDICO-UNIVERSITAIRE DE HAMBOURG, ALLEMAGNE.

50 % des contaminations dues aux asymptomatiques

Plus de la moitié des nouvelles contaminations seraient transmises par des personnes asymptomatiques, qu'il s'agisse de celles qui ne développeront jamais de symptômes ou de patients en phase présymptomatique. C'est le résultat d'un modèle fondé sur une méta-analyse de huit études en Chine. Les personnes symptomatiques restent plus contagieuses, mais les mesures d'isolement diminuent leur impact sur l'épidémie.

SOURCE : MICHAEL JOHANSSON, CENTRE DE CONTRÔLE DES MALADIES AMÉRICAIN.

Dans dix ans, le Covid-19 pourrait devenir un rhume de l'enfant

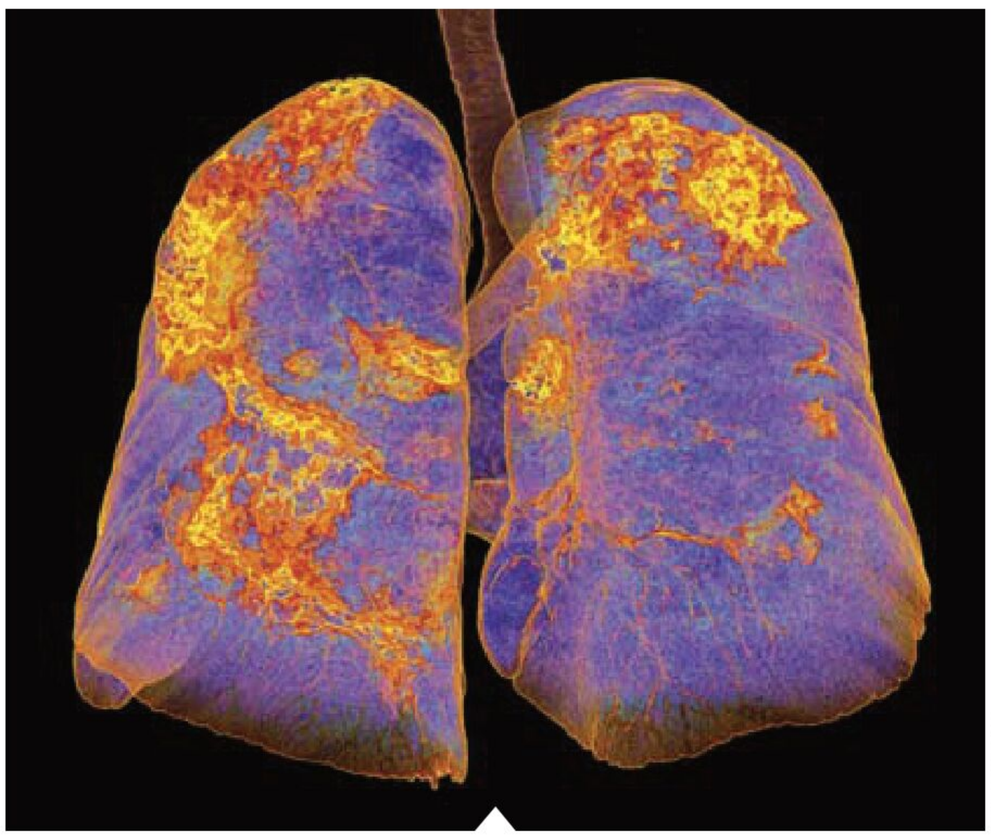
D'ici à une dizaine d'années, le Covid-19 sera passé du stade pandémique à une circulation endémique. À mesure que les populations s'immuniseront — par la vaccination ou par une infection —, il pourrait devenir surtout une maladie bénigne de la petite enfance touchant les 3 à 5 ans. Les plus âgés pourraient eux aussi être infectés, mais avec un risque bien moindre qu'aujourd'hui de faire des formes sévères.

SOURCE : ALEXANDER A. COHEN ET AL., CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ÉTATS-UNIS.

La double greffe de la dernière chance

Un premier patient français atteint d'une forme sévère de Covid-19 a subi avec succès une double transplantation pulmonaire. Une opération à très haut risque qui nécessite un protocole bien particulier.

C'EST UNE OPÉRATION CLÉ pour ceux dont les poumons ont été irrémédiablement détruits par le Covid-19. Un sauvetage *in extremis* qui n'est toutefois possible que pour une poignée de patients, les plus gravement atteints. À ce jour, une seule personne en France a pu bénéficier d'une double transplantation pulmonaire, autrement dit de la greffe simultanée des deux poumons. Une première en France pour un patient atteint du Covid-19, précédée d'une vingtaine d'autres réparties entre la Chine, la Corée du Sud, les États-Unis, la Belgique, l'Italie et l'Autriche où a eu lieu la première mondiale dès mars. En France, il s'agit d'un homme de 58 ans, infecté lors de la « deuxième vague » cet automne, et opéré le 1er novembre à l'hôpital Foch de Suresnes (Hauts-de-Seine) après avoir passé six semaines en réanimation. *« Aujourd'hui, il n'est plus sous respirateur artificiel. Il va bien. Il commence à récupérer la masse musculaire nécessaire à une respiration autonome*, rapporte le Pr Édouard Sage, chef adjoint du service de chirurgie thoracique et de transplantation pulmonaire à l'hôpital Foch. *Il fait quelques pas chaque jour mais c'est un peu comme demander à quelqu'un qui n'a jamais marché de courir un marathon ! Par chance, notre patient est incroyable ; une force de la nature, physiquement et psychiquement, extrêmement volontaire dans la prise en charge »*, poursuit le chirurgien. En effet, la sélection du patient nécessitant une greffe tout étant capable de supporter une telle opération est délicate. *« Ce sont des cas très rares »*, insiste Édouard Sage.



SPL/PHANIE

Scanner 3D de poumons atteints de pneumonie atypique due au coronavirus Sras-CoV-2 responsable du Covid-19.

Pour comprendre l'intérêt d'une chirurgie aussi lourde, rappelons quelques chiffres. Environ 30 % des patients admis en réanimation pour Covid-19 décèdent, la majorité des autres quittant le service après quelques semaines pour entreprendre une récupération de plusieurs mois. *« Mais entre les deux, il y a une zone frontière : des hommes et des femmes qui survivent et sont stabilisés, mais pour lesquels l'amélioration est impossible car les poumons sont irrémédiablement atteints. »* À l'imagerie, les lésions observées sur plusieurs semaines indiquent une fibrose pulmonaire chronique voire terminale, sans signe de récupération. De fait, l'atteinte des poumons due au Covid-19 est plus complexe que celle qui peut survenir lors d'une grippe par exemple, où l'on n'observe pas ce genre de destruction pulmonaire dite fixée.

En décembre 2020, une équipe du Northwestern Hospital à Chicago (États-Unis) qui avait opéré au cours de l'année deux hommes de 43 et 62 ans et une femme de 28 ans atteinte du Covid-19, a publié l'étude fine de leurs tissus pulmonaires détruits dans *Science Translationnal Medicine*. Surprise ! plus aucune trace du virus n'était décelable dans les poumons explantés, mais ceux-ci présentaient les caractéristiques d'une fibrose pulmonaire chronique « classique » jusque dans l'expression génétique de leurs cellules. D'autres critères sont tou-

HOPITAL FOCH

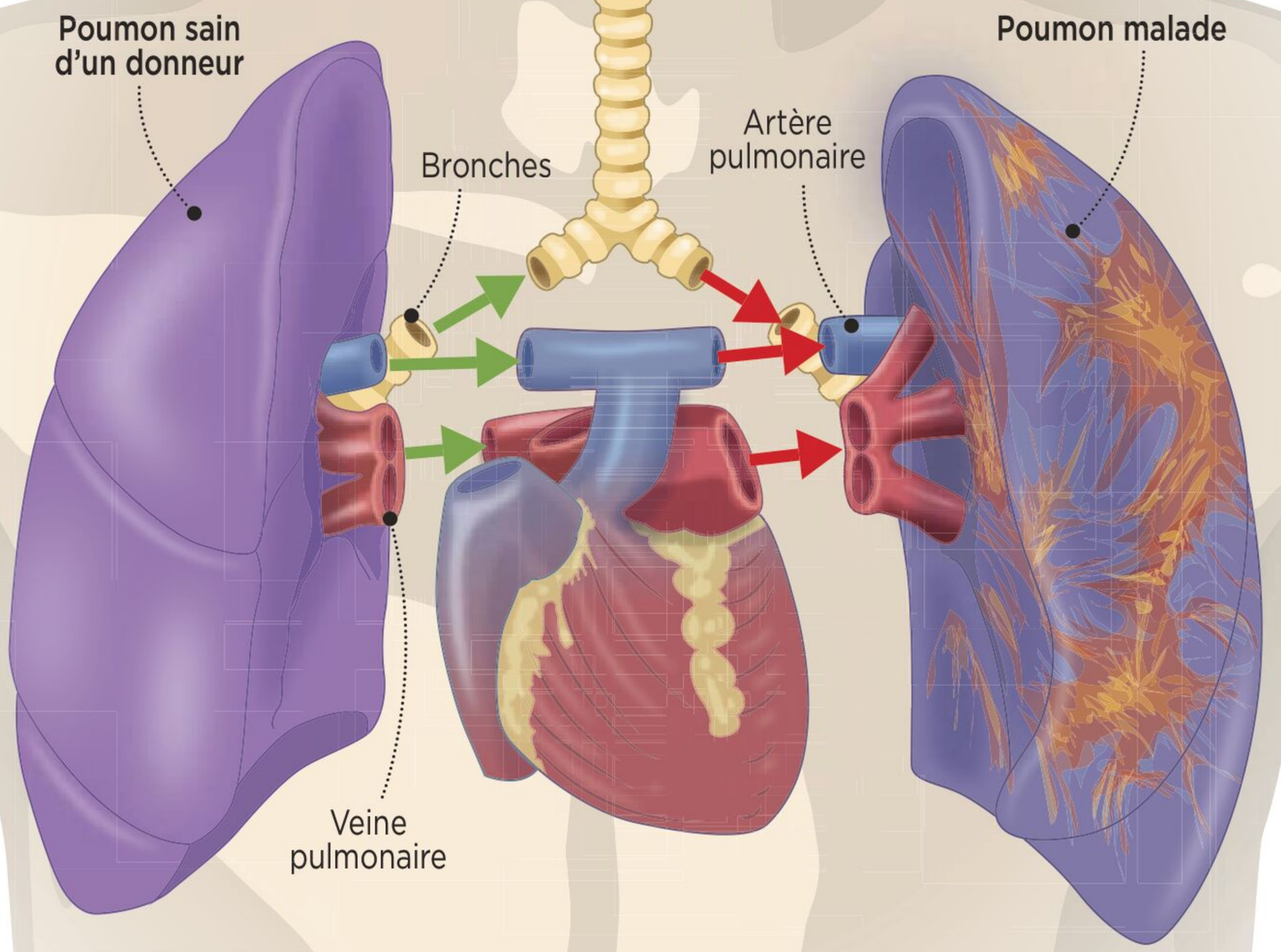
« L'opération doit être très bien préparée car chez ce profil de patient, les risques de complications se cumulent »

Pr Édouard Sage, chef adjoint du service de chirurgie thoracique et de transplantation pulmonaire à l'hôpital Foch de Suresnes (Hauts-de-Seine)

TRANSPLANTATION

Une opération en deux temps

Pour maximiser les chances de réussite, les chirurgiens procèdent par séquences. Dans un premier temps, le poumon le plus abîmé est retiré. Le second est maintenu en place afin d'assurer un soutien au dispositif d'oxygénation extracorporelle (ECMO) auquel est relié le patient. Le greffon est ensuite raccordé aux bronches et aux vaisseaux sanguins. Dans un second temps, ces étapes sont répétées avec l'autre poumon.



BRUNO BOURGEOIS

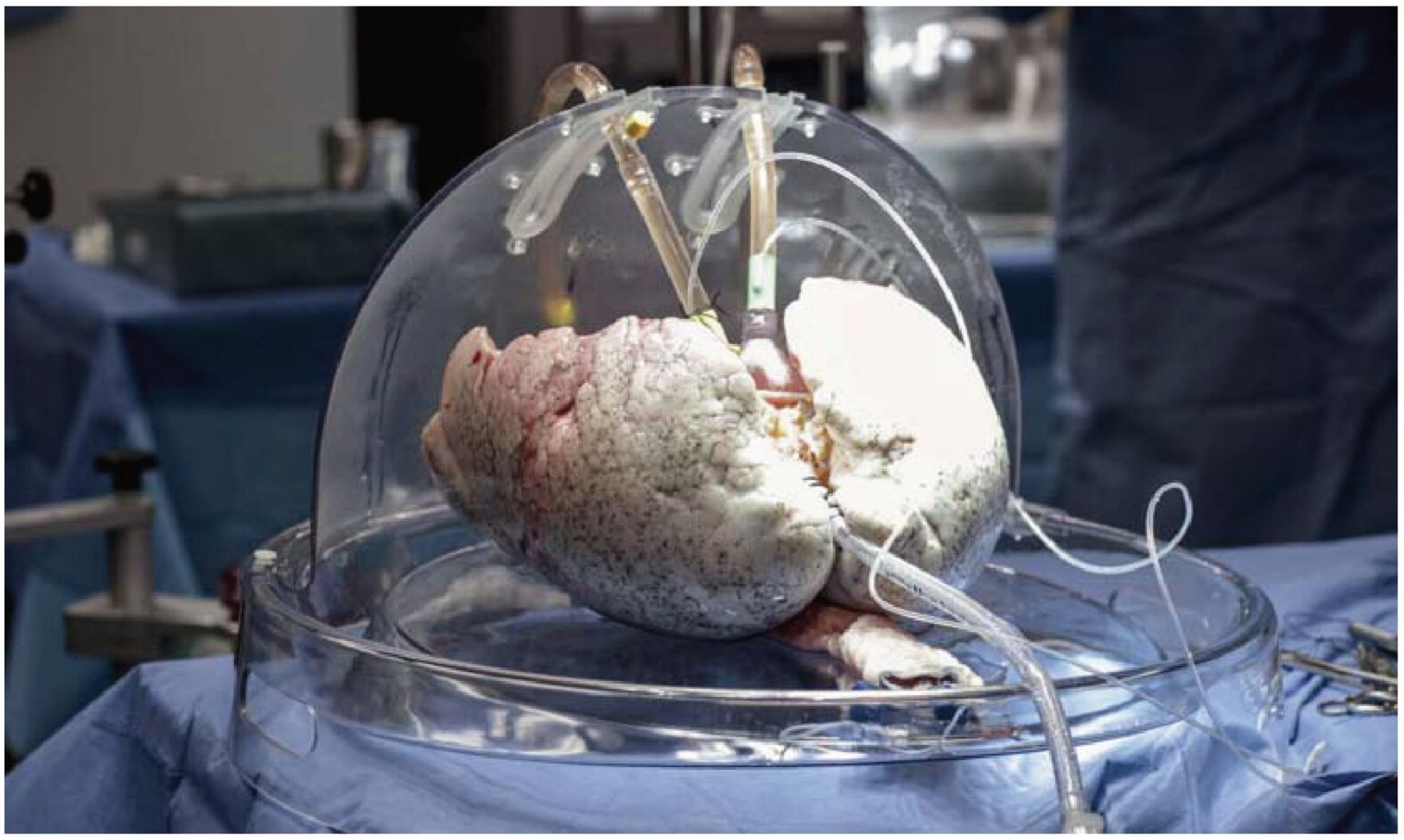
tefois nécessaires pour légitimer la double transplantation, ce qui complique encore la sélection des patients. Pour supporter l'intervention, ces derniers ne doivent pas être trop âgés, ni obèses ni être atteints de multiples comorbidités. Or ce sont précisément ceux-là, les plus sévèrement atteints, qui sont majoritairement pris en charge par les services de réanimation.

Des poumons « plâtrés » aux tissus alentour

Lorsque l'un d'eux satisfait aux critères et offre des garanties suffisantes de réussite de l'opération, les médecins doivent aller très vite. Et pour cela, *« le système français est très efficace puisque nous avons accès à une liste dite de superurgence mise en place en 2007, qui nous permet d'obtenir un greffon en 48 heures auprès de l'Agence de biomédecine. Pour notre patient, nous l'avons reçu en 24 heures »*, précise le spécialiste.

Par elles-mêmes, les doubles transplantations ne sont pas une nouveauté puisqu'elles sont pratiquées depuis 1986. Mais celles dues au Covid-19 demandent un surcroît de prudence. Notamment au moment de l'explantation des poumons détruits. Selon le chirurgien américain Ankit Bharat qui a opéré une femme à Chicago (États-Unis) en juin, l'inflammation due à la maladie avait laissé les poumons *« comme "plâtrés" aux tissus qui les entourent : le cœur, la paroi thoracique et le diaphragme »*. *« L'opération n'est pas forcément plus technique. Mais elle nécessite d'être très bien préparée, car chez ce profil de patient, les risques de complication se cumulent »*, précise Édouard Sage. D'abord, le ou la malade est maintenu en vie par une ventilation artificielle invasive et une oxygénation extracorporelle (ECMO) : sa circulation sanguine est dérivée sur une machine qui oxygène le sang — ce que ne peuvent plus faire les poumons — avant de le réinjecter dans l'organisme. *« C'est déjà un degré extrême de médicalisation, aux limites de ce que nous sommes capables de faire et qui demande une débauche d'énergie et des moyens très importants. »*

Or ces techniques de survie engendrent elles-mêmes des complications. Ainsi, la ventilation invasive crée ce que les spécialistes appellent des barotraumatismes : elle pousse l'air dans les poumons augmentant ainsi la pression sur les tissus. Ce qui est le contraire du phénomène naturel où c'est une dépression du diaphragme qui fait entrer l'air dans les poumons, avec peu de pression donc. Sur un poumon fragilisé, la pression exercée par la ventilation peut faire céder la membrane alvéo-capillaire et créer des pneumothorax : de l'air se répand entre les poumons et la cavité thoracique... Et plus l'oxygénation est importante en raison de la dégradation de l'état de santé du malade, plus la pression est forte. *« Nous sommes obligés d'installer des drainages pour évacuer l'air, lesquels provoquent plus d'adhérences, d'inflammations, d'hémorragies... »*, précise Édouard Sage. Et ce n'est pas tout ! Dans le même temps, l'ECMO perturbe la chimie du sang et facilite les saignements. Enfin, les corticoïdes ▶



UHN

CONSERVATION

Optimiser les capacités des greffons

Depuis quelques années, la perfusion *ex vivo* des greffons pulmonaires *(photo)* s'est imposée « en routine » car elle permet d'optimiser les capacités de l'organe avant qu'il ne soit transplanté. Durant les quelques heures qui précèdent l'opération, les poumons sont nourris, oxygénés et nettoyés d'éventuelles sécrétions bronchiques. La technique a permis d'augmenter le nombre de greffons en bon état pour être transplantés.

qui sont administrés au malade — c'est le seul traitement dont l'efficacité a été prouvée pour traiter le Covid-19 — sont aussi connus et utilisés pour leur effet immunosuppresseur... et donc anticicatrisant. *« C'est un lourd cumul de complications. Il faut anticiper le nombre de poches de sang suffisant et avancer prudemment lors de l'opération. »*

Les chirurgiens procèdent donc par séquence *(voir l'infographie p. 79)* : retirer le poumon le plus abîmé d'abord, pour garder le moins atteint en soutien ; raccorder le greffon aux bronches et aux artères et veines ; puis répéter les étapes avec le second poumon. Les deux greffons d'environ 600 grammes chacun ont séjourné au préalable pendant quelques heures au sein d'un appareil de perfusion *ex vivo* afin d'en assurer la bonne conservation et d'optimiser leurs fonctions *(voir ci-dessus)*. En tout, il faut compter près de dix heures d'opération.

Le Covid-19 est devenu une indication à part entière pour la double transplantation pulmonaire. *« Nous sommes en contact avec des services de réanimation un peu partout en France pour évaluer si d'autres cas actuellement hospitalisés pourraient être éligibles. Pour l'instant, nous n'en avons pas encore identifiés*, précise Édouard Sage. *Grâce aux vaccins, j'espère d'ailleurs que nous aurons peu d'occasions de réitérer l'opération même si nous savons que d'autres transplantations auront lieu. »* Celles-ci pourraient même intervenir bien plus tard. Certains patients, pourtant sortis de réanimation, vont en effet souffrir de fibrose pulmonaire chronique. Ce qui conduira certains d'entre eux à une insuffisance respiratoire terminale nécessitant cette double transplantation. Les conséquences à long terme du Covid n'ont pas fini d'être explorées. ■

Hugo Jalinière @hugojaliniere

DÉFENSES IMMUNITAIRES

La radiothérapie pour enrayer la destruction du poumon

De faibles doses de radiothérapie ciblée sur les lésions pulmonaires de patients atteints de Covid-19 ont montré qu'elles permettaient de contrecarrer l'atteinte des tissus et de favoriser la cicatrisation. Plusieurs équipes dans le monde y ont eu recours au cours de l'année dans le cadre d'études dites compassionnelles. Mais en France, les autorisations n'ont pas été accordées. Toutefois, l'équipe du Pr Éric Deutsch au centre anticancer Gustave-Roussy de Villejuif (Val-de-Marne) a pu en explorer les mécanismes sous-jacents sur des modèles animaux de pneumonie atypique. Il apparaît que l'irradiation reprogramme les macrophages, des cellules qui peuvent phagocyter les agents pathogènes, pour les rendre plus anti-inflammatoires. *« C'est dommage que nous soyons cantonnés à des études non cliniques alors que les résultats positifs convergent et que nous pourrions contribuer encore plus efficacement à cette recherche »*, regrette Éric Deutsch dans une interview accordée à *La Recherche**. Ailleurs, les études se poursuivent pour déterminer précisément pour quels patients et à quelle dose d'irradiation la radiothérapie est la plus efficace.

* sciav.fr/LaRechercheDeutsch

Les émotions dépendraient de la culture

Loin d'être innées, ces états d'esprit se rattacheraient à la connaissance que l'on en a, affirment des chercheurs dans une récente étude.

RÉMY CORTIN

La reconnaissance des émotions dépendrait du niveau de leur connaissance et ne serait donc pas innée. Les chercheurs ont en effet identifié un même réseau neuronal responsable à la fois de l'une et de l'autre.

NON, NOUS NE RECONNAÎTRIONS PAS tous les émotions de la même façon ! *« Nos résultats contredisent la vision prédominante en sciences cognitives selon laquelle les émotions sont universelles et que nous sommes "câblés" de manière innée à les expérimenter et les reconnaître »*, lance en effet Maxime Bertoux, coauteur de l'étude qui a apporté la première preuve clinique de la théorie dite constructiviste des émotions. Ce courant, développé dans les années 1960 par les psychologues américains Stanley Schachter et Jérome Singer et repris en 2006 par la neuroscientifique Lisa Feldman Barrett, postule que les émotions sont des états d'esprit construits dépendant des spécificités culturelles de chacun. Une théorie qui va donc à l'inverse du concept d'émotions innées formulé par le naturaliste anglais Charles Darwin dès 1872.

Ce sont des personnes atteintes d'une maladie rare, l'aphasie primaire progressive sémantique qui se caractérise par une perte progressive des apprentissages (comme « Paris est la capitale de la France »), qui ont permis aux neuroscientifiques de l'Inserm, de l'université de Caen Normandie, de l'École pratique des hautes études et des CHU de Caen et de Rennes. Chez ces patients, tout ce qui est inné demeure intact. Mais ils distinguent mal les émotions : ils ont des difficultés à en donner des synonymes, des exemples ou des contextes dans lesquels on peut les ressentir. De plus, ils peinent à reconnaître des émotions sur des visages, allant jusqu'à inverser leur sens. Plus ces difficultés sont importantes, plus ils accusent un déficit de substance grise (cette matière distribuée sur la surface du cerveau qui contient les corps cellulaires des neurones) comme le révèle l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Conclusion : c'est le même réseau neuronal qui est responsable à la fois des connaissances et de la reconnaissance des émotions.

Un enrichissement du vocabulaire primordial

La capacité à reconnaître les émotions dépend donc de leur connaissance, tandis que le vécu des émotions est influencé par la culture de chacun, concluent les scientifiques. Ainsi l'expression de la joie, de la surprise ou de la peur est mieux caractérisée dans les pays riches, industrialisés, éduqués, démocratiques et occidentaux, selon les chercheurs.

Pour Maxime Bertoux, cette étude montre qu'enrichir les connaissances émotionnelles est primordial. *« Un meilleur rapport aux émotions, par l'enrichissement du vocabulaire émotionnel des enfants, par des enseignements spécifiques aux émotions, par une exposition plus grande à des œuvres fictionnelles, et éventuellement, en cas de souffrance, par des thérapies cognitives et comportementales, permet une meilleure reconnaissance des émotions, et sans doute une meilleure régulation de ces dernières »*, conclut le neuroscientifique. ■

Marion de Vevey

5 questions pour surmonter les maux de l'hiver

De l'assiette à l'armoire à pharmacie, en passant par les loisirs, bons réflexes et gestes de prévention peuvent faire de l'hiver une saison de bien-être.

1 Pourquoi est-on plus malade quand il fait froid ?

Plusieurs facteurs contribuent à faciliter la circulation des microbes l'hiver. À commencer par la promiscuité liée aux froides températures qui nous conduisent à passer plus de temps à l'intérieur, au contact les uns des autres. Une mauvaise nouvelle quand on sait que 80 % de ces microbes se transmettent par les mains. « *La diminution spectaculaire cet hiver des cas de grippe, gastro-entérite ou même de bronchiolite atteste que des gestes simples de protection, comme le lavage des mains et d'objets partagés à l'école ou en crèche, contribuent efficacement à réduire la circulation des virus* », confirme Sidney Sebban, pédiatre et directeur médical du réseau bronchiolite Île-de-France. La virulence des infections est également liée à la résistance plus importante de nombreuses particules virales avec le froid et l'humidité, alors même que nos défenses immunitaires sont carencées — et donc affaiblies. Le manque de vitamine D, qui concerne 80 % de la population (selon l'étude nationale Nutrition santé), est particulièrement préjudiciable. D'où l'importance de s'exposer à la lumière naturelle, indispensable à la synthèse de la précieuse vitamine.

AFP

2 Comment bien se soigner ?

Si les microbes attaquent plus l'hiver, compléments alimentaires et médicaments aident à faire face. Mais gare aux prescriptions mal appropriées ou supplémentations mal dosées. Pour preuve : l'abus récurrent d'antibiotiques face aux rhumes et angines. 11 millions de boîtes sont encore vendues chaque hiver selon l'Académie de pharmacie, alors que dans neuf cas sur dix… les rhumes sont d'origine virale ! Pour les angines, vous pouvez bénéficier en officine de tests — les TROD angine — qui identifient rapidement l'origine (virale ou bactérienne) de l'infection — et donc le traitement approprié. « *N'hésitez pas à prendre conseil auprès de votre pharmacien*, explique Martial Fraysse, de l'Académie de pharmacie. *À partir de 65 ans, il est possible de bénéficier d'un bilan de médication en officine, qui permet de vérifier la pertinence et les interactions possibles entre traitements.* » L'accompagnement est aussi précieux pour les supplémentations de saison : qu'il s'agisse de la vitamine D, qui peut se prendre en doses quotidiennes ou ampoules plus fortement dosées, ou du zinc, dont le dosage standard, de 15 mg par jour, peut être affiné en fonction de l'âge et du poids.

3 Quelle est la bonne température de chauffe ?

Chauffer à la bonne température les intérieurs est essentiel pour éviter d'avoir froid, mais aussi pour se préserver des chocs thermiques entre ▶

CHIFFRES

45 min
Le temps minimum quotidien en plein air recommandé en hiver par l'OMS.

79 % des Français auraient recours à l'automédication en hiver, contre 49 % l'été.
SOURCE : APIFA (ASSOCIATION FRANÇAISE POUR UNE AUTOMÉDICATION RESPONSABLE).

200
Le nombre de virus responsables de rhumes.
SOURCE : BRITISH MEDICAL JOURNAL.

Par Régis de Closets, avec Agence Forum News

Si le symptôme pour lequel vous envisagez de prendre ce médicament évoque une infection Covid19, contactez votre pharmacien ou votre médecin.

OU sur L52, un médicament homéopathique aux 10 substances actives utilisé pour lutter contre les symptômes de l'état grippal.

Fièvre, frissons, courbatures, maux de tête.
L52 de Lehning est un médicament homéopathique traditionnellement utilisé dans le traitement des états grippaux.

Sans somnolence.

Disponible sans ordonnance en pharmacie.

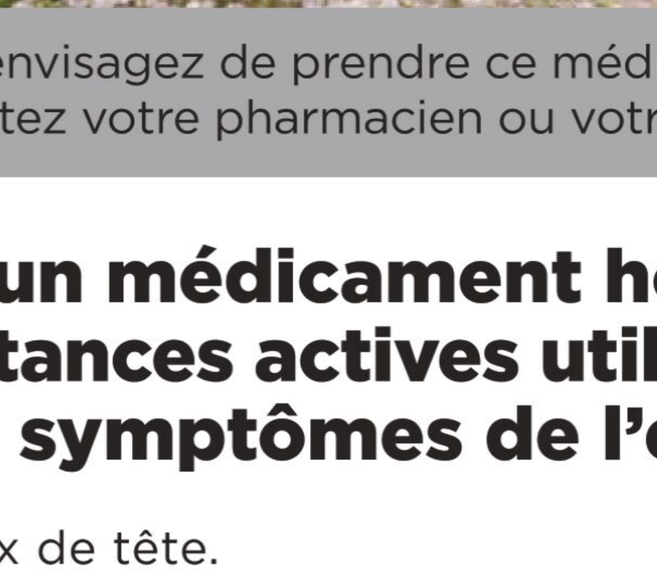
FABRIQUÉ EN FRANCE

À partir de 2 ans

VU à la TV

NOUVEAU

À partir de 30 mois



Contient de l'alcool

OU

Contient du lactose

Lire attentivement la notice. Si les symptômes persistent, consultez votre médecin. Demandez conseil à votre pharmacien.

Laboratoires Lehning 3, rue du petit marais 57640 Sainte-Barbe.
VISA N°19/03/68789050/GP/001 - 2021-PI-006

LEHNING
LABORATOIRES

AVIS D'EXPERT

ISABELLE BOSSE, allergologue et présidente du Syfal (Syndicat français des allergologues)

« La pollution intérieure est une menace sous-évaluée »

L'hiver, nos organismes sont-ils plus exposés à la pollution intérieure ?
C'est une menace sous-évaluée. L'hiver est la saison où nous sommes plus souvent à l'intérieur, dans des espaces plus chauffés mais aussi moins aérés du fait du froid extérieur. Or, c'est une saison où notre air intérieur peut être particulièrement pollué. Par des moisissures, par les composés organiques volatiles disséminés par nos produits d'entretien ou les éléments de combustion — bois de chauffage, bougies parfumées, encens. C'est également une époque où le taux d'acariens est le plus élevé — car l'hiver suit la période de ponte et multiplie d'autant leur présence. Tout cela peut provoquer des irritations des voies nasales et respiratoires, propres à déclencher ou aggraver des asthmes. Il est essentiel d'aérer régulièrement son domicile, particulièrement la chambre à coucher. Pour les personnes allergiques, nous recommandons de le faire au minimum 15 minutes matin et soir.

SYFAL

Quel peut être l'impact de la pollution extérieure ?
L'hiver est une saison où les pics de pollution sont nombreux — et il est démontré qu'ils entraînent une augmentation des hospitalisations pour crise d'asthme. Il faut donc être prudent ces jours-là. Mais la pollution aux particules fines a également un effet plus insidieux en s'agrégeant aux pollens, ce qui contribue à les rendre d'autant plus allergènes lors de la pollinisation.

Les personnes allergiques sont-elles plus vulnérables ?
Globalement, oui. Elles peuvent contracter plus facilement des rhumes — des études ont montré une proportion de rhinovirus plus importants chez les personnes allergiques que dans la population générale. Cela est dû à leurs muqueuses inflammatoires plus « poreuses » et moins résistantes aux virus. Attention également aux pollens : avec le réchauffement climatique, certains apparaissent plus tôt (bouleau, noisetier) et des patients consultent dès janvier, alors qu'avant les crises se déclenchaient plutôt en mars. ■ **Propos recueillis par R. de C.**

des intérieurs très tempérés et un environnement extérieur hivernal. Ces écarts brusques de températures peuvent être à l'origine de blessures musculaires et faciliter les infections microbiennes. Au domicile, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) recommande de conserver une ambiance fraîche autour de 18 °C (jusqu'à 20 °C pour les personnes les plus âgées). Pour la chambre à coucher, l'Institut national du sommeil et de la vigilance (INSV) préconise de rester entre 16 et 18 °C, température idéale pour faciliter le sommeil profond et réparateur. Au bureau, en revanche, la température peut grimper. Des recherches conduites par l'US Army auprès de ses contrôleurs aériens ont montré qu'une pièce chauffée entre 22 et 26 °C permet une meilleure concentration. Une étude anglaise auprès du personnel d'une compagnie d'assurances a même calculé qu'en abaissant de 25° à 20 °C la température dans les bureaux, le nombre de fautes commises par les employés doublait !

4 Quelles sont les bonnes habitudes pour rester en forme ?

Face aux virus et baisses de moral hivernales, l'hygiène de vie est particulièrement déterminante. Elle commence dans l'assiette, avec des repas à agrémenter d'agrumes (sources de vitamine C et d'anti-oxydants) et d'un légume et féculent *(lire aussi p. 86)*. « *Les légumes peuvent être frais ou surgelés et cuisinés sous forme de soupes, salades, risotto,* », détaille la nutritionniste Mathilde Gibeaux, présidente de l'association Miam.
Préservez également les repas à heures fixes qui préviennent de la tentation du grignotage. Les perturbations du sommeil, liées aux raccourcissements des jours, favorisent en effet les comportements alimentaires compulsifs. « *Les études conduites auprès de personnes en travail de nuit ou à horaires décalés confirment que des déphasages persistants augmentent les pulsions et troubles alimentaires* », explique le docteur Jean-Michel Lecerf, chef du service de nutrition de l'Institut Pasteur de Lille.
Autre élément clé : l'activité physique, qu'il est possible de pratiquer en extérieur, à condition d'adapter son effort. Augmentez le temps d'échauffement de 25 à 30 % et hydratez-vous régulièrement pour limiter les risques de blessures — favorisées par une moindre souplesse musculaire en hiver. Veillez aussi à limiter l'effort quand le thermomètre passe sous 0 °C — une étude américaine en 2010 a montré que 50 % des coureurs manifestent alors une respiration sifflante, signe d'irritation bronchique. La pratique doit être particulièrement surveillée pour les profils à risque — asthmatiques et cardiaques. Pensez enfin à bien couvrir vos extrémités — 70 % de la perte de chaleur dans l'effort y est associée (dont 30 % rien que par la tête).

5 Comment garder le moral durant la saison froide ?

Plutôt que de faire de l'hiver la saison de la déprime avec jours raccourcis et mauvais temps, pourquoi ne pas en faire la saison de la *slow-life*, occasion de se donner du temps à soi et au repos ? Les activités ne manquent pas pour soigner le bien-être en hiver. L'écoute de musique augmenterait de 6 à 9 % le niveau de dopamine sécrété dans le cerveau, selon une étude canadienne publiée dans *Nature* en 2011. Des bains chauds réguliers aideraient également à rééquilibrer notre rythme circadien, selon les chercheurs de l'université de Fribourg (Allemagne). Plusieurs stations de sports d'hiver (Morzine, La Clusaz, les Saisies), proposent même des cours de « snowga », un yoga d'hiver originaire du Canada, à pratiquer dans la neige et en combinaison de ski. ■

PRENDRE SOIN DE VOUS, C'EST NOTRE METIER

CHAÎNE THERMALE DU SOLEIL

agit naturellement pour votre santé

1er **choix de destinations**
avec 20 stations thermales dans des cadres naturels exceptionnels.

1er **choix de cures** : Rhumatologie, Phlébologie, Voies Respiratoires, Appareil Digestif, Dermatologie…

1er **éventail de soins exclusifs**, mis au point en concertation avec les Centres Hospitaliers Universitaires, le Corps Médical et les équipes thermales.

1ère **équipe d'experts en médecine et soins thermaux**, complétée d'éducateurs sportifs, diététiciens, psychologues et sophrologues, en relation avec 52 associations de patients.

1er **choix de cures spécifiques** :
Lombalgie, fibromyalgie, gonarthrose, acouphènes, troubles du sommeil, suite de cancer du sein…

1er **suivi médical de post-cure**
à 3, 6 et 9 mois.

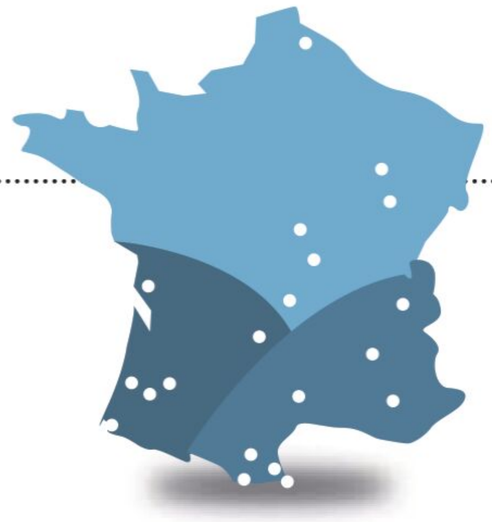
1er **choix d'hébergements** réservables en une fois avec votre cure.

1er **choix de cures pour les actifs** :
mini-cures de 6 jours et cures nocturnes.

1er **choix des curistes** : 190 000 curistes nous ont fait confiance en 2019.

COVID-19 Charte sanitaire station thermale

Toutes nos mesures de protection pour la sécurité et le confort de votre cure sur CHAINETHERMALE.FR



TROUVEZ VOTRE CENTRE DE CURE chainethermale.fr

Documentation & renseignements gratuits

01 88 32 86 36

Je désire recevoir gratuitement le guide 2021 des cures de la Chaîne Thermale du Soleil

Nom : ..... Prénom : .....
Adresse : .....
Ville : ..... Code postal : .....
Téléphone : ..... Email : .....

Merci de renvoyer ce coupon à :
Chaîne Thermale du Soleil - Centrale de réservation Flandres - 1283 route Fontaine Bouillon - 59230 Saint-Amand-les-Eaux

Les données collectées sur ce coupon font l'objet d'un traitement au sens de la loi Informatique et Libertés du 6 janvier 1978 modifiée et du RGPD. Vos données seront conservées 3 ans afin de mieux communiquer avec vous et vous proposer des produits ou services analogues. Vous disposez, à tout moment, d'un droit d'accès, de rectification, de limitation, d'effacement et de portabilité de vos données, du droit de définir des directives relatives au sort de ces données après votre décès, d'un droit d'opposition et du droit de retirer votre consentement à tout moment. Vous pouvez exercer vos droits par voie postale à l'adresse suivante : CHAINE THERMALE DU SOLEIL, Service de traitement des données à caractère personnel, 32 avenue de l'Opéra, 75002 PARIS ou par email à : dpo@chainethermale.fr. Vous disposez également du droit d'introduire une réclamation auprès de la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés.

SA0221

Agence MEESTERS - Crédit photo : Marielsa Niels

Les légumes racines sans modération

Fort d'une cinquantaine d'espèces, ces végétaux particulièrement riches en anti-oxydants et en nutriments connaissent un réel engouement auprès des consommateurs.

ILS FONT LEUR GRAND RETOUR en cuisine. Cultivé depuis le Moyen Âge, le panais, cousin de la carotte séduit par sa saveur légèrement sucrée ; le crosne, par son délicat goût d'artichaut ; le radis noir pour son côté piquant. Pourtant, certains légmes racines — comme le topinambour et le rutabaga — ont longtemps été laissés de côté sur les étals des marchés, victimes du mauvais souvenir laissé par leur usage pendant l'Occupation. Aujourd'hui, ces grands oubliés reviennent au goût du jour, notamment grâce à l'intérêt de nombreux chefs. Mais sans surprise, c'est la carotte qui reste la préférée des Français. Celle-ci doit sa couleur orange caractéristique aux horticulteurs hollandais qui croisèrent à la fin du XVI[e] siècle des variétés rouges et blanches, retenant cette teinte en hommage à la maison d'Orange qui gouvernait alors les Provinces-Unies. Cap sur ces légumes souterrains redécouverts pour leurs saveurs authentiques et leurs qualités nutritives.

Ils constituent une source de nutriments

Le céleri-rave cru et le topinambour cuit offrent une bonne source de potassium (respectivement 500 mg/100 g et 452 mg/100 g) (1), soit près d'un quart des apports journaliers recommandés. Les légumes racines fournissent du calcium (47 mg/100 g de salsifis) et du magnésium (29 mg/100 g de panais cuit), un minéral nécessaire à la formation des os et des dents et à la contraction musculaire. Ils apportent du zinc (0,34 mg/100 g de topinambour cuit) et du cuivre (0,21 mg/100 g de crosne cuit), utiles au système immunitaire, du phosphore (43 mg/100 g de patate douce cuite) et du manganèse (0,31 mg/100 g de betterave cuite). Avec 0,71 mg/100 g, la patate douce couvre près d'un tiers des besoins quotidiens de l'humain en fer (1 à 2 mg). Les légumes racines fournissent également de la vitamine C (16,2 mg/100 g de patate douce), E (1 mg/100 g de panais) et B9 (67,4 mg/100 g de folate pour le céleri-rave cuit), indispensable à la bonne croissance neuronale du fœtus. La carotte cuite apporte de la vitamine K en quantité modérée (13,7 mg/100 g), qui favorise la coagulation sanguine.

9,2 kg

de carotte par an et par ménage sont consommés par les Français contre 900 g pour le navet et 500 g pour le céleri-rave. (Source : Kantar Worldpanel, 2017)

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

INDICE ORAC Il permet d'évaluer la capacité d'un aliment à absorber les radicaux libres produits par l'organisme. Exprimé en unités pour 100 g, il est calculé au moyen d'un test qui porte le même nom. Plus l'indice est élevé, plus le potentiel anti-oxydant de l'aliment est important.

FRUCTANE Polymère constitué de molécules de fructose. Il fait partie des fructo-oligosaccharides (ou FOS) et constitue la réserve glucidique de certaines plantes comme les graminées et le blé.

INDICE GLYCÉMIQUE (IG) Critère de classement des aliments contenant des glucides, basé sur leurs effets sur la glycémie. Un aliment à IG élevé provoque un pic du taux de sucre dans le sang suivi d'une baisse rapide.

Ils sont riches en anti-oxydants

Grâce à ses flavonoïdes et bétalaïnes, la betterave figure parmi les légumes au meilleur potentiel anti-oxydant, se traduisant par un indice ORAC de 1776 µmol TE/100 g. Des travaux montrent qu'après la digestion *in vitro*, la quantité de polyphénols disponible ainsi que le pouvoir anti-oxydant du jus de betterave sont multipliés par trois (2). Le panais contient de l'apigénine, un puissant anti-oxydant de la famille des flavonoïdes. La couleur orangée de certains légumes racines est due au bêta-carotène, précurseur de la vitamine A : la patate douce en fournit 10 500 µg/100 g, la carotte crue 8290 µg/100 g et 3340 µg/100 g cuite.

Carotte et panais préviendraient les maladies cardio-vasculaires

Ces deux légumes racines contiennent également deux autres pigments de la famille des caroténoïdes, la lutéine et de la zéaxanthine (3), qui protègent les yeux de la cataracte et de la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA). Des travaux montrent que la lutéine pourrait aussi supprimer l'inflammation à long terme chez les personnes atteintes de maladie coronarienne. Plus le niveau de lutéine dans le sang est élevé, plus celui d'interleukine-6 (IL-6), un marqueur de l'inflammation, est faible (4). Chez la souris, la consommation de carottes entraînerait une diminution de 41 % du cholestérol et de 49 % des triglycérides dans le plasma et dans le foie. Des effets peut-être dus à l'action synergique des fibres et des anti-oxydants du légume (5). À noter que les caroténoïdes qui sont des composés liposolubles, doivent être ajoutés à des matières grasses pour être mieux assimilés par l'organisme.

Ils facilitent la digestion

Riches en fibres (4,5 g/100 g de céleri-rave cru, 3,1 g/100 g de salsifi cuit), les légumes racines apportent un sentiment de satiété et limitent les risques de grignotage. Leurs fibres solubles, essentiellement de l'inuline, un polysaccharide de la famille des fructanes forment un gel, qui stimule le transit intestinal et augmente la fréquence des selles. L'inuline, peu assimilée par l'intestin grêle, jouerait le rôle de prébiotique et contribuerait ainsi à maintenir l'équilibre de la flore intestinale et à renforcer la perméabilité intestinale (6). Par ailleurs, le radis noir aiderait à dissoudre les calculs biliaires chez la souris, selon une étude mexicaine. Cet effet serait dû à sa teneur en glucosinolates, des composés soufrés qui auraient la capacité de diminuer le taux de cholestérol hépatique (7).

La betterave améliore les performances physiques

C'est ce que montre une petite étude américaine réalisée auprès de 11 hommes et femmes en bonne santé. Leur vitesse moyenne de course sur une distance de 5 kilomètres était de 12,3 km/h après avoir consommé 200 g de betterave cuite (fournissant plus de 500 mg de nitrates) contre 11,9 km/h après la prise d'un placebo (canneberges). Ces bons résultats pourraient s'expliquer par la richesse de la betterave en nitrates. Dégradés par la salive en nitrites, puis en oxyde nitrique, ils joueraient un rôle de vasodilatation et augmenteraient l'oxygénation des muscles durant un effort physique (8). ■

Sylvie Boistard @syboistard

ISELINE ROSSI Diététicienne-nutritionniste, à Montpellier.

Ils sont peu caloriques et rassasiants

« Les légumes racines sont peu caloriques (20 à 30 kcal/100 g), exceptés le panais et le topinambour (respectivement 67,8 et 81,9 kcal/100 g), en raison de leur teneur en glucides complexes, lentement absorbés par l'organisme. Comparée à la pomme de terre, la patate douce possède un indice glycémique (IG) modéré de 45, les carottes cuites de 50, ce qui limite les pics glycémiques. Même la betterave cuite, qui affiche 6,7 g de sucres/100 g garde un IG de 64. Les légumes racines sont donc particulièrement intéressants pour couvrir les besoins en glucides qui doivent représenter 55 % des apports énergétiques quotidiens. Pour profiter pleinement de leurs bienfaits, on les consomme crus chaque fois que cela est possible ou après une cuisson douce, à la vapeur ou au four à basse température. »

(1) Table Ciqual

(2) A beetroot juice shot is a significant and convenient source of bioaccessible antioxidants, Wootton-Beard P.C. et al., *J. Funct. Foods*, 2011.

(3) Review on nutritional composition of orange-fleshed sweet potato and its role in management of vitamin A deficiency, Neela S. et al, *Food Sci. Nutr.*, 2019.

(4)Lutein exerts anti-inflammatory effects in patients with coronary artery disease, Chung R. et al, *Atherosclerosis,* 2017.

(5) Effect of carrot intake on cholesterol metabolism and on antioxidant status in cholesterol-fed rat, Nicolle C. et al, *Eur. J. Nutr.*, 2003.

(6) Effects of a diet based on inulin-rich vegetables on gut health and nutritional behavior in healthy humans, Hiel S. et al, *Am J Clin Nutr,* 2019.

(7) Raphanus sativus L. var niger as a source of phytochemicals for the prevention of cholesterol gallstones, Castro-Torres IG. et al, *Phytother. Res.*, 2014.

(8) Whole beetroot consumption acutely improves running performance, Murphy M. et al, *J. Acad. Nutr. Diet.*, 2012.

À Saqqarah, le retour des momies

Depuis des mois, les autorités égyptiennes annoncent régulièrement l'exhumation de centaines de momies de la nécropole de Saqqarah située au pied de la célèbre pyramide à degrés. Des annonces aussi politiques… que scientifiques.

Par Sylvie Briet

AP PHOTO/MAHMOUD KHALED/SIPA

INFOGRAPHIES : BRUNO BOURGEOIS

QUATORZE SARCOPHAGES, puis cinquante-neuf, puis cent ! C'est une avalanche d'annonces des autorités égyptiennes qui est tombée ces derniers mois. Ces sarcophages inédits datent de la Basse Époque (entre 700 et 300 avant J.-C.) et de la période ptolémaïque (de 323 à 30 avant J.-C.). Scellés, en bois peint et pour la plupart d'une fraîcheur incroyable, ils sont restés inviolés jusqu'à aujourd'hui, ce qui est très rare. Les archéologues de la « mission archéologique égyptienne » sous l'égide du Conseil suprême des antiquités les ont déterrés à Saqqarah, une immense nécropole du désert située à une vingtaine de kilomètres au sud du Caire. En fait, depuis 2018, les chercheurs exhument à un rythme effréné, tombeaux richement décorés, sarcophages et momies innombrables. Des découvertes archéologiques qui tombent à pic alors que les attentats puis l'épidémie de Covid-19 ont découragé les touristes *(lire l'encadré p. 90)*. Et ce d'autant plus que l'ouverture du Grand Musée égyptien (GEM) du Caire appelé à devenir le plus grand musée d'égyptologie au monde (500 000 m²), plusieurs fois repoussée, devrait enfin avoir lieu — au moins partiellement — cette année.

Plus austère et moins spectaculaire que les autres nécropoles, Saqqarah tient sa revanche et les autorités ne ménagent pas leurs efforts pour rendre ce site incontournable dans les circuits consacrés à l'Égypte antique. Le fait que le ministre des Antiquités Khaled el-Enany qui annonce aux médias les découvertes soit aussi celui du Tourisme suscite des interrogations : quel est l'intérêt scientifique réel d'annonces intégrées à des opérations de communication bien rodées ? Ces découvertes « *uniques* » ou « *exceptionnelles* » le sont-elles vraiment ? « *Au départ je n'étais guère enthousiaste,* reconnaît Philippe Collombert, professeur à l'université de Genève (Suisse), qui dirige la mission franco-suisse de Saqqarah (mais n'a pu se rendre sur le site en 2020 à cause de l'épidémie de Covid-19), et qui étudie les textes de la pyramide de Pépi I^er^ (2300 avant J.-C.), au sud de la nécropole. *La première annonce de 14 sarcophages n'avait rien d'ex-*

SIPA

La pyramide de Djéser domine l'immense nécropole de Saqqarah.

Mostafa Waziri, secrétaire général du Conseil suprême des antiquités d'Égypte, présente à la presse un des sarcophages découvert en octobre 2020 à Saqqarah, dévoilant devant les caméras une momie enveloppée dans son linceul.

traordinaire. Lorsque nous fouillons là-bas, nous en découvrons deux ou trois tous les ans, c'est assez commun. Mais une centaine ! Là, c'est une vraie découverte. Les chercheurs vont pouvoir réaliser des études statistiques et avancer dans la description de cette époque. »

Les cent sarcophages révélés le 14 novembre 2020 reposaient au fonds de trois puits funéraires creusés à 12 mètres de profondeur. « *Tous proviennent de la même zone, au nord du site*, explique Mohammed Youssef, le directeur des fouilles du site de Saqqarah. *Mais ils sont de types différents. L'embaumement était plus ou moins bien fait selon la richesse du défunt. Parfois un grand sarcophage en contient un plus petit, certains portent des inscriptions : le nom du mort, et ceux de son père et de sa mère.* » Le jour de l'annonce aux médias, les archéologues ont ouvert devant les caméras l'un des sarcophages, et ont découvert en direct une momie enveloppée d'un linceul orné de hiéroglyphes. Son passage aux rayons X a révélé qu'il s'agit d'un homme sans pathologie apparente mort vers 40-45 ans. « *La grande majorité des occu-*

Deux années de découvertes à un rythme effréné

Novembre 2018	Décembre 2018	Avril 2019	Septembre 2020	Octobre 2020	Novembre 2020
7 tombes dont 4 datées de plus de 4000 ans. À l'intérieur, des scarabées et des chats momifiés ainsi qu'une centaine de statuettes de chats.	Tombe d'un grand prêtre, Wahty, datée de 2400 avant J.-C., durant la Ve dynastie, sous le règne de Néferirkarê.	Tombe de Khuwy, un noble de la Ve dynastie, entre 2500 et 2300 avant J.-C.	13 sarcophages de la XXVIe dynastie (664-525 avant J.-C.) Puis 14 nouveaux sarcophages de la même époque.	32 nouveaux sarcophages, toujours de la même époque, portant le total à 59.	100 sarcophages dans 3 puits funéraires datant du VIe au Ier siècle avant J.-C.

pants sont des hommes et il n'y a que quelques femmes et enfants de moins de 15 ans, poursuit Mohammed Youssef. *Au vu de la qualité de l'embaumement et des décorations, nous pensons que la plupart sont des dignitaires des dernières dynasties pharaoniques, des personnages de haut rang qui travaillaient dans les temples.* »
Saqqarah, qui fut la nécropole de Memphis, capitale de l'Ancien Empire (2700 à 2200 avant J.-C.) fait partie d'un ensemble funéraire ininterrompu qui part de Gizeh, le plateau des grandes pyramides, passe par Abousir, Zaouiet el-Aryan, va jusque Dahchour au sud. Pour y parvenir aujourd'hui, on passe sans transition d'une zone verte et très peuplée qui longe le Nil au désert le plus aride où seuls les nuances d'ocre et les reliefs permettent de distinguer pyramides, entrées de puits funéraires, monticules... Le plateau de Saqqarah possède cette particularité unique d'avoir été utilisé comme nécropole durant toute l'Egypte antique, depuis

KHALED DESOUKI / AFP

Une centaine de statues de chat en bois ou en bronze ont été exhumées en novembre 2018.

les toutes premières dynasties et même jusqu'à aujourd'hui. Soit près de 5000 ans. Autant dire que le sous-sol, même pillé maintes fois, recèle encore des quantités inestimables de vestiges.

Des tombes maintes fois réutilisées durant 3000 ans

C'est ici que se trouve notamment la célèbre pyramide à degrés, la première de l'ère pharaonique, construite pour le roi Djéser vers 2700 avant J.-C. « *Ce fut d'abord un cimetière royal. Les pharaons s'y firent enterrer durant l'Ancien Empire*, explique Christiane Ziegler qui dirigea la mission archéologique du Louvre à Saqqarah à partir de 1991 et y fouilla jusqu'en 2007. *Deux mille ans plus tard, à la Basse Époque, crépuscule de l'Égypte pharaonique, Saqqarah est toujours très utilisée même si elle n'accueille plus les rois. Elle reste la nécropole de Memphis, une ville toujours active. Autour, toute une population travaillait pour le culte des divinités locales, en particulier le dieu Ptah et son représentant sur Terre, le taureau sacré Apis. Le Sérapéum, complexe funéraire dédié à ce dieu vivant, drainait des milliers de pèlerins venus déposer leurs ex-voto. Les malades affluaient dans les centres de soins voisins, placés sous la protection d'Imhotep, architecte de la pyramide à degrés et promu dieu des Médecins à la Basse Époque.* »
Durant trois millénaires, les tombes de Saqqarah furent maintes fois réutilisées, et quand la place manquait, les vivants entassaient les sarcophages au fond de puits, ce qui est probablement arrivé à ceux que l'on vient de découvrir. Un nom, inscrit sur un tiers des cent retrouvés, a fourni une précieuse indication aux archéologues pour les dater. C'est celui de Psammétique I^{er}, fondateur de la XXVI^{e} dynastie, qui régna de 664 à 610 avant notre ère. « *Cela ne signifie pas qu'il est enterré là. C'était une façon*

COMMUNICATION

Une mise en scène millimétrée

Suspense et aventure ! La communication archéologique en Égypte n'a rien à envier au cinéma façon *Indiana Jones* dont elle reprend ouvertement les codes. Chaque découverte est mise en scène, rejouée, et intègre dans son casting les mêmes *guest stars* : le ministre du Tourisme et des Antiquités, et le secrétaire général du Conseil suprême des antiquités. De Louxor à Saqqarah, du nord au sud, les annonces n'ont lieu qu'en grande pompe devant un parterre de journalistes. Quant aux vidéos mises en ligne par le ministère sur Facebook ou Twitter, elles maîtrisent parfaitement l'art du *teasing* : « *Restez connectés pour l'annonce de la nouvelle découverte archéologique demain !* » Le script varie peu : lever de soleil sur les pyramides, vues spectaculaires du désert et de la vallée du Nil filmés par drone, archéologues suspendus à une corde descendant au fond d'un puits, avancée dans les souterrains à la lampe de poche et... « *it's the moment !* » (« *c'est le moment* »), s'écrie l'archéologue, déclenchant l'enthousiasme de la petite assemblée de privilégiés réunie autour d'une momie. Les dialogues, interprétés par des archéologues, ouvriers, chercheurs, tous égyptiens nous est-il précisé, ménagent le suspense : « *Chaque seconde apporte quelque chose de neuf.* » « *Ce que nous avons découvert au cours de ces trois dernières années ne représente pas 10 % de ce que nous devons encore trouver. Ce n'est que le début...* » Des nouvelles découvertes sont attendues dès ce début 2021.

KHALED DESOUKI / AFP

de lui rendre hommage, de perpétuer son nom », précise Mohammed Youssef.

C'est bien le nombre de sarcophages qui rend la découverte intéressante. On peut parler comme le définit Philippe Collombert, d'une « petite société » à un moment précis, charnière dans l'histoire de l'Égypte, la Basse Époque, moins connue que l'Ancien Empire (avec les tout premiers rois et les grandes pyramides) ou le Nouvel Empire (1500 à 1000 avant J.-C.), avec les pharaons les plus connus (Thoutmosis, Ramsès, Toutankhamon... enterrés dans la Vallée des Rois). La Basse Époque est marquée par les invasions étrangères, les Nubiens puis les Perses s'emparent tour à tour du trône.

Entre deux défaites, les pharaons égyptiens incarnent des sursauts nationalistes, et brillent de leurs derniers feux. Paradoxalement, le pays reste prospère. « *Les Égyptiens sont plus ouverts sur l'extérieur*, précise Christiane Ziegler, *ils mènent des échanges commerciaux avec le bassin méditerranéen notamment la Grèce* ». La XXX[e] dynastie sera la dernière dynastie égyptienne complètement indépendante. Mais ses rois seront défaits par les Perses. Alexandre Le Grand, qui vaincra ces envahisseurs, sera accueilli comme un libérateur, tout en installant lui-même un pouvoir étranger. À sa mort, le pays revient à l'un de ses généraux, Ptolémée, qui fonde une dynastie qui régnera jusqu'en 30 avant J.-C.

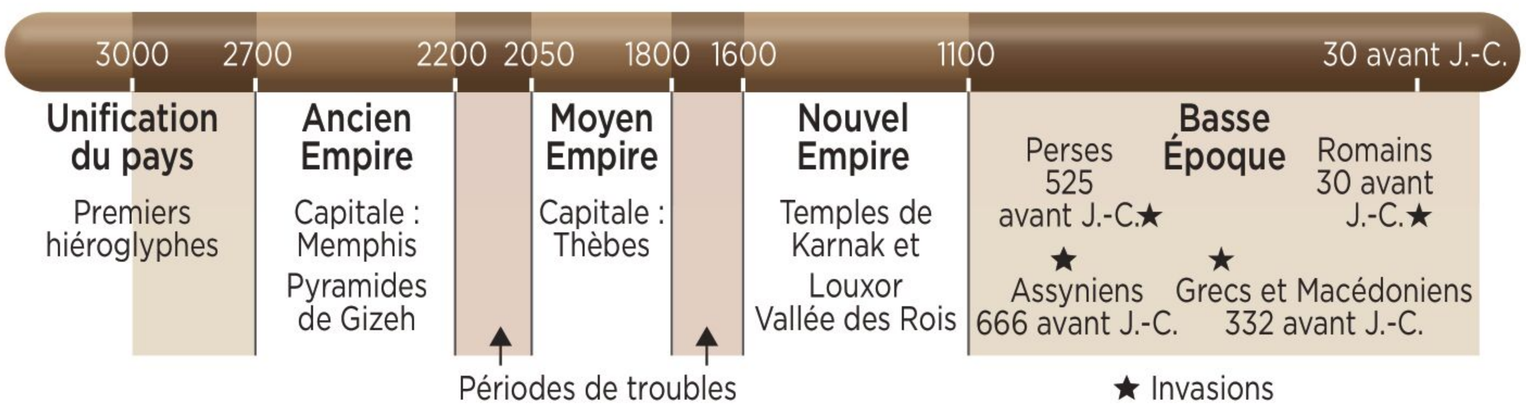
ANCIEN EMPIRE

Un somptueux tombeau

Découvert en 2018 non loin de la pyramide à degrés, *(photo ci-dessus)*, ce tombeau est celui de Wahty, un prêtre de haut rang qui vécut durant l'Ancien Empire, sous le règne du roi Néferirkarê (2446 à 2438 avant J.-C.) soit 2000 ans avant les occupants des sarcophages récemment mis au jour. Sur les murs richement décorés, des reliefs peints montrent le défunt avec sa mère et sa femme mais aussi des scènes de la vie quotidienne.

Les nouvelles découvertes complètent celles de la mission du Louvre de Christiane Ziegler : en 2007, elle avait également dégagé des chambres souterraines entièrement remplies de sarcophages datant de la Basse Époque. « *Nous les avions laissés en place par souci de conservation*, précise l'archéologue, *Il n'existait pas de structure capable de les accueillir*. » Mais aujourd'hui, ce n'est plus le cas : l'Égypte possède désormais des laboratoires et musées modernes. Après l'effervescence et les caméras du monde entier, les sarcophages vont pouvoir connaître le calme des études. Beaucoup ont déjà été répartis dans les différentes institutions, dont le futur Grand Musée égyptien. ■

Une civilisation qui a duré trois millénaires



Le « duel de dinosaures » sera bientôt visible

Pièce mythique de la paléontologie, le fossile connu sous le nom de « dinosaures se battant en duel », trouvé en 2006 aux Etats-Unis, va enfin être étudié et exposé au public.

LE FOSSILE SUPERBEMENT PRÉSERVÉ d'un jeune *Tyrannosaurus rex* et d'un *Triceratops*, emmêlés comme s'ils étaient morts au combat, vient d'être acquis par le Musée des sciences naturelles de Caroline du Nord (NCMNS, Raleigh, États-Unis). Après des années passées entre des mains privées et une véritable saga juridique ! Cette pièce vieille de 67 millions d'années, connue sous le nom de « dinosaures se battant en duel » (*Dueling Dinosaurs*, en anglais) a été exhumée en 2006, sur le ranch de la famille Murrays, dans le Montana, par l'équipe du chasseur de dinosaures de Clayton Phipps. Au départ, aucun musée n'accepte de l'acheter.

JULIUS CSOTONYI, NCMNS

Les fossiles seront extraits de leur gangue pour être analysés. Les opérations se feront en présence du public.

La découverte crée un litige tranché par la Cour suprême

Les paléontologues critiquent les méthodes des fouilles et ses buts mercantiles. Même si aux États-Unis, les fossiles dénichés sur des terres privées peuvent être légalement vendus par les propriétaires fonciers. L'affaire des *Dueling Dinosaurs* prend un nouveau tournant en 2015, quand des exploitants miniers du sous-sol du domaine des Murrays tentent de faire valoir leurs droits sur le fossile, arguant que celui-ci s'est minéralisé avec le temps. D'interminables combats judiciaires suivent et, fait historique, la Société américaine de paléontologie des vertébrés (SVP) ainsi qu'un consortium de musées écrivent un mémoire en faveur des propriétaires fonciers, portant le cas jusque devant la Cour suprême de l'État du Montana.

« Lier les fossiles aux droits miniers — très éclatés et compliqués — aurait rendu difficile l'obtention de l'autorisation de fouiller et jeté le doute sur les propriétaires des fossiles déjà exposés », estime David Polly, ancien président de la SVP. En mai 2020, la cour déclare que les fossiles ne peuvent être considérés comme des ressources minières tels l'or ou le diamant. Les scientifiques sont soulagés, de nouvelles tractations s'enclenchent pour une vente. Lindsay Zanno, paléontologue à la North Carolina State University et responsable du département paléontologie du NCMNS, négocie et achète, grâce à des dons d'amis du musée, *« le joyau caché depuis une décennie »* pour un montant proche de 6 millions de dollars (4,95 millions d'euros).

« Le fossile sera hébergé dans une nouvelle extension du musée, comprenant un laboratoire de paléontologie ultramoderne, qui ouvrira en 2022 », explique la chercheuse. Le public observera en direct les scientifiques extrayant les animaux de leurs gangues. Des centaines d'études sont prévues, sur les os, les dents, comme sur les impressions laissées par leur peau ou de possibles restes de protéines. Les causes de la mort du tyrannosaure et du tricératops seront recherchées. Ont-ils succombé à un combat, avant d'être ensevelis par les mêmes sédiments ? Ou leurs corps se sont-ils retrouvés mêlés à la suite de mouvements de terrain ? L'autopsie le dira. ■

Rachel Mulot @RachelFleaux

Les femmes aussi chassaient le gros gibier

Les hommes à la chasse, les femmes à la cueillette ? Cette division des tâches n'avait pas cours à la préhistoire sur le continent américain.

À quoi ressemblait la chasseuse ?

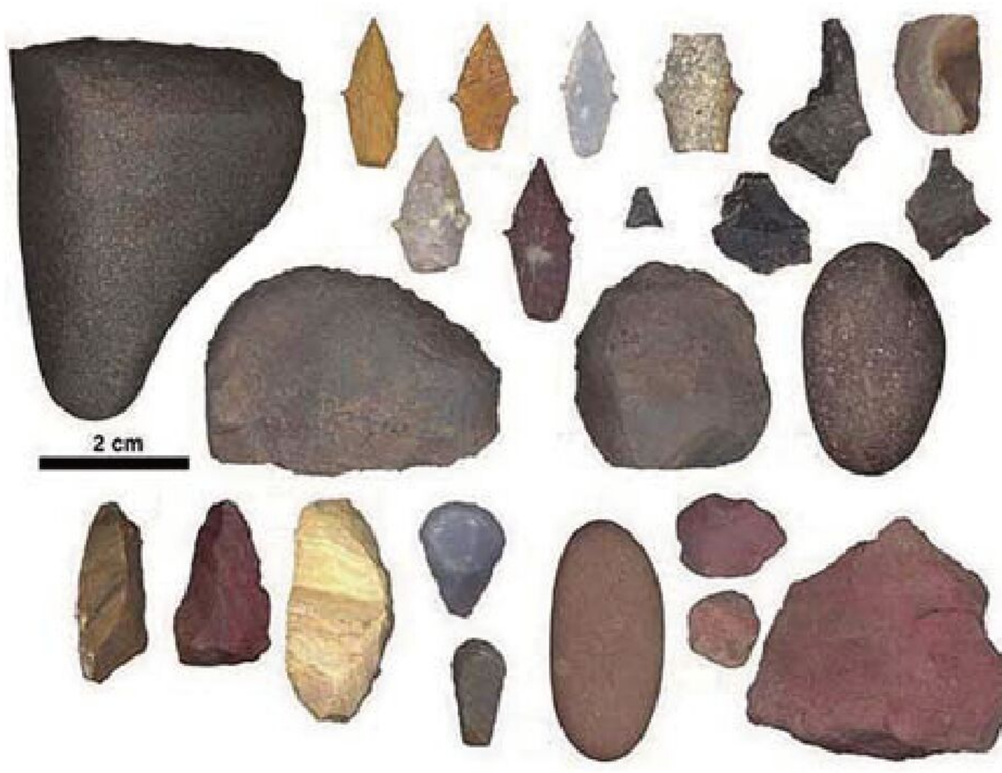
La mauvaise conservation et le petit échantillon osseux rendent l'estimation difficile, mais sa stature devait être comparable à celle des femmes des régions andines d'aujourd'hui, soit 1,50 m.

Quels animaux affrontait-elle ?

En Amérique du Sud, il y a environ 10 000 ans vivaient alors la vigogne, le taruca (cerf des Andes) et le puma. En Amérique du Nord, le mastodonte, le mammouth, le bison, le cheval et le paresseux géant.

Chassait-elle seule ou en groupe ?

Probablement les deux. Aujourd'hui, les communautés andines encerclent des vigognes pour les capturer, femmes, hommes comme enfants y participant. Des représentations rupestres suggèrent que de telles chasses communautaires existaient dans le passé.



RANDALL HAAS, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, DAVIS

Ces pointes de flèches (en haut) destinées à abattre de gros animaux et ces outils avaient été déposés dans la tombe d'une adolescente morte il y a 9000 ans.

Elle reposait dans les hautes terres andines de Wilamaya Patjxa, près du lac Titicaca, au sud du Pérou, à côté d'une panoplie bien garnie d'armes de chasse au gros gibier depuis neuf mille ans. Les restes d'une jeune fille âgée de 17 à 19 ans ont été découverts par Randall Haas, anthropologue à l'université de Californie à Davis (États-Unis) , avec *« des pointes de projectiles en pierre pour abattre les gros animaux, un couteau et des éclats de roche pour enlever les organes internes et des racloirs pour gratter et tanner les peaux »*. Il y a quelques années encore, le simple fait d'exhumer un corps avec ces armes aurait conduit les scientifiques à assurer que celui-ci était tout bonnement celui d'un homme... Mais une analyse des protéines des dents a révélé qu'il était de sexe féminin.

La surprise a stimulé la curiosité des paléontologues. WMP6 (autrement dit Wilamaya Patjxa 6) était-elle l'exception ? D'autres tombes américaines recelaient-elles des chasseuses, jusqu'alors passées inaperçues ? Les scientifiques ont examiné les archives des fouilles de 18 autres sites funéraires répartis à travers l'Amérique du Nord et du Sud. Sur 27 individus enterrés avec des armes de chasse au gros gibier, 11 se sont révélés être des femmes, grâce aux nouvelles méthodes d'analyses. Selon l'équipe, *« entre 30 % et 50 % des humains qui traquaient le gros gibier il y a 10 000 ans dans les Amériques étaient possiblement des femmes. »* Pas la parité, mais presque ! ■

Rachel Mulot

@RachelFleaux

INTERVIEW

RANDALL HAAS

ANTHROPOLOGUE À L'UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À DAVIS (ÉTATS-UNIS)

« NOUS DEVONS ÊTRE CONSCIENTS DE NOS PRÉJUGÉS SUR LES FEMMES PRÉHISTORIQUES »

« Lorsque nous avons découvert le squelette WMP6 et les armes de chasse associées, nous avons supposé — honteusement — qu'il s'agissait d'un homme. Mais en examinant les restes en laboratoire, le bio-archéologue de notre équipe, Jim Watson (de l'université de l'Arizona), a conclu que l'individu était une femme sur la base de sa structure relativement gracile.

Sceptiques, nous voulions une approche plus fiable pour être sûrs que le chasseur était une chasseuse. Heureusement, j'avais déjà collaboré avec le médecin légiste Glendon Parker (de l'université de Californie) qui a récemment développé une méthode très précise pour l'estimation du sexe fondée sur les protéines dans l'émail dentaire. C'était bien une adolescente. Nous devons être conscients de nos préjugés sur les femmes préhistoriques. Car le plus étonnant était à venir ! Cette chasseuse n'est pas un cas isolé. Nos découvertes m'ont amené à repenser la structure organisationnelle la plus élémentaire des anciens groupes de chasseurs-cueilleurs. »

« Toutes les écritures ont commencé avec des rébus »

L'écriture a été inventée à plusieurs reprises et à plusieurs endroits. Dans cet ouvrage, Silvia Ferrara s'attarde sur le rôle déclencheur du rébus dans ce processus.

ÉDITIONS DU SEUIL

Silvia Ferrara, professeure de philologie mycénienne à l'université de Bologne (Italie), est à la tête d'un groupe de recherche, Inscribe, financé par une bourse du Conseil européen de la recherche, qui tente de percer les mystères de cinq systèmes anciens d'écriture encore non déchiffrés aujourd'hui.

« Mon intérêt pour l'invention de l'écriture est né du fait qu'il y a plusieurs systèmes d'écriture anciens, environ une douzaine dans le monde, qui n'ont pas été déchiffrés. Avec mon groupe, nous en étudions cinq — dont le linéaire A (Crète) et le rongorongo (île de Pâques). Lorsque j'ai déposé une demande de financement auprès du Conseil européen de la recherche, afin d'avancer sur leur déchiffrement, je me suis dit que j'avais besoin d'une vue d'ensemble, de comprendre comment ces systèmes d'écriture anciens que j'étudie, et tous les autres, naissent, y compris dans nos esprits. Car l'invention de l'écriture reste quelque chose de très mystérieux. Jusqu'à il y a une génération environ, nous pensions que, comme toute invention humaine (la roue, le feu…), elle n'avait été inventée qu'une seule fois : en Mésopotamie, à la fin du quatrième millénaire avant notre ère. Et puis, en l'espace de trente ans, cette vision a été complètement chamboulée. Aujourd'hui, nous savons avec certitude qu'il y a eu au moins quatre inventions différentes de l'écriture dans le monde : en Mésopotamie, bien sûr, mais aussi en Égypte, en Chine et au Mexique [un autre système ancien d'écriture, utilisé en Iran, a récemment été déchiffré, *lire l'encadré*]. C'est tout bonnement incroyable !

La Fabuleuse Histoire de l'invention de l'écriture, Silvia Ferrara, Seuil, 320 p., 22 €

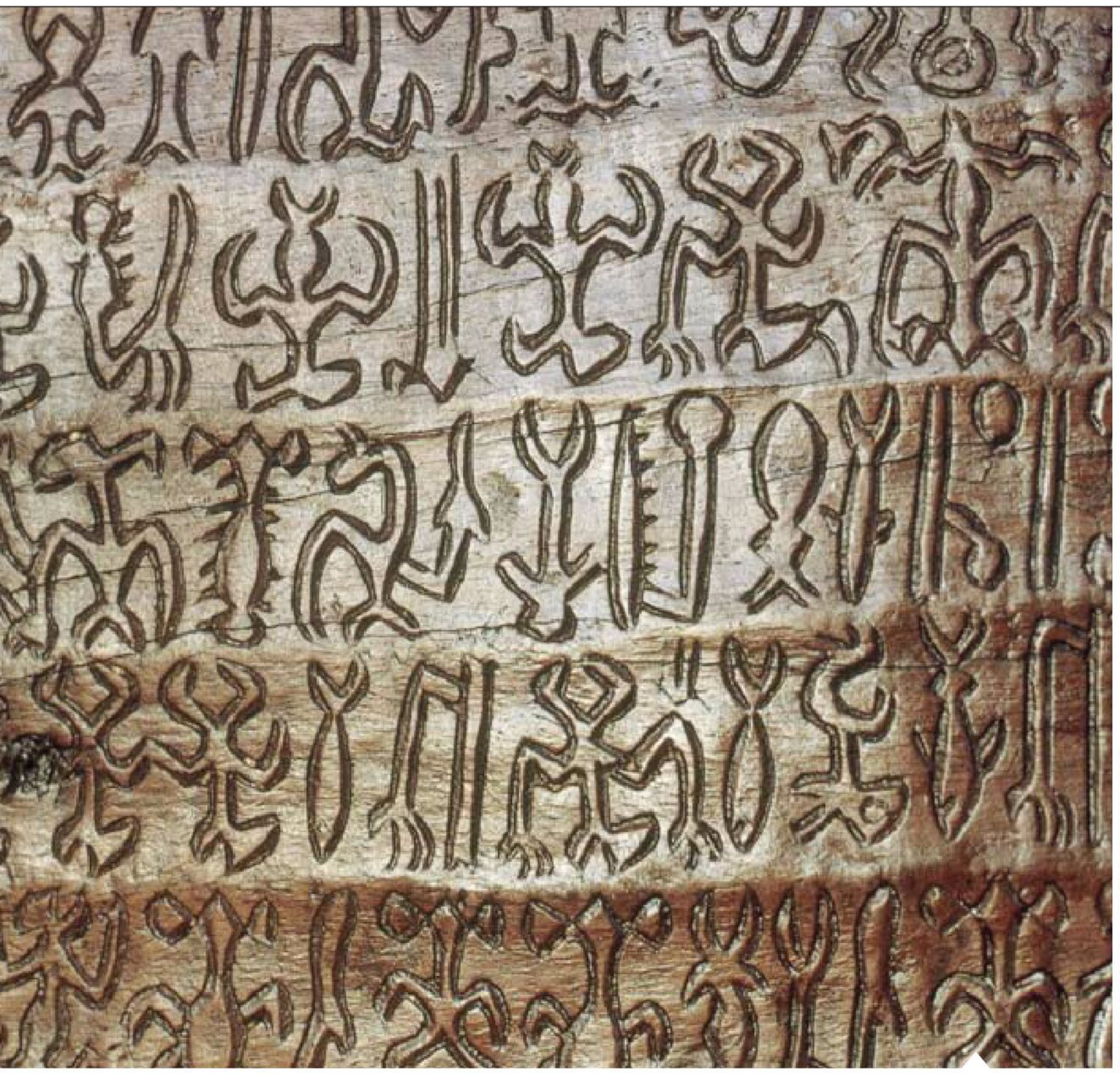
Comment plusieurs cultures humaines, sans jamais s'être rencontrées ou avoir communiqué entre elles, ont-elles pu avoir la même idée ? Comment se fait-il que nous, les scientifiques, ne sachions pas dire combien de fois précisément l'écriture a été inventée ? Que se passe-t-il dans l'esprit des humains pour rendre possible la création d'un système d'écriture, sa transmission de génération en génération ? Enfin, pourquoi cela a-t-il pris autant de temps, au cours de notre évolution, pour arriver à ces inventions ? Nous nous sommes ainsi intéressés aux mécanismes cognitifs et linguistiques qui rendent possible l'enregistrement de sons sous forme de signes écrits ou dessinés. Partout où l'invention de l'écriture s'est produite *ex nihilo*, ces mécanismes sont-ils identiques ? Existe-t-il, au moins, un paramètre commun ? Et nous l'avons trouvé, ce paramètre systématique, il s'agit du rébus. Le rébus est un processus très naturel, créatif et spontané, qui vient avec l'assonance, qui vient avec le jeu de mots. C'est un signe que vous pouvez utiliser pour deux valeurs sémantiques, deux significations, complètement différentes. Et toutes les écritures inventées *ex nihilo* le pratiquent : elles utilisent des signes existants, les logogrammes, et étendent leur valeur sémantique pour représenter des choses qui, à un niveau logographique, ne sont pas faciles à représenter. Les Sumériens, par exemple, utilisaient le signe indiquant la flèche (*ti*) pour représenter aussi un mot très beau mais abstrait : *til* ("la vie").

Mais le rébus n'est qu'une étincelle. L'invention d'un système d'écriture est un lent processus. Il y a besoin de temps pour qu'un nouveau code graphique soit pleinement intégré par notre système

DÉCOUVERTE

L'Iran, l'autre berceau de l'écriture

La nouvelle a provoqué l'enthousiasme de tous les spécialistes qui ont assisté à l'annonce, faite en ligne, lors d'un séminaire de l'université de Padoue (Italie) : comme *Sciences et Avenir* l'a révélé début décembre, l'archéologue français François Desset (laboratoire Archéorient de Lyon) est parvenu, avec trois collègues, à déchiffrer complètement des inscriptions en élamite linéaire, un système d'écriture utilisé en Iran il y a 4400 ans. Un long travail qui a commencé à porter ses fruits en 2018, lorsque le chercheur a proposé une interprétation qui permettait de lire certains noms propres contenus sur ces inscriptions. L'élamite linéaire a été précédé, dans la même région, par le proto-élamite, utilisé vers 3300/3200 avant notre ère, ce qui remet en question le consensus actuel, selon lequel les premiers exemples d'écriture viennent de Mésopotamie puisqu'un autre système d'écriture existait donc en Iran à la même époque.



SCIENCE PHOTO LIBRARY/GEORGE HOLTON

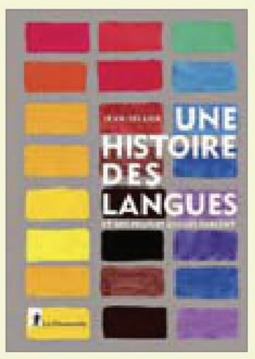
Le rongorongo de l'île de Pâques, qui se présente sous la forme de signes gravés sur du bois, est un des systèmes d'écriture anciens non déchiffrés à ce jour étudié par Silvia Ferrara.

cognitif, et pour que ce code soit perfectionné et débouche sur un répertoire limité de signes, qui feront sens en tant que système, seront utilisés et transmis aux générations suivantes. Ce processus requiert par ailleurs l'intervention d'une institution. Celle-ci n'est pas forcément un État. Bien sûr, la plupart des principaux États que nous avons connus depuis l'Antiquité ont développé l'écriture. Seulement, la correspondance n'est pas parfaite. Prenez le royaume de Kerma, dans l'ancienne Nubie (2500 à 1500 avant notre ère). Prenez aussi les Incas. Voilà une culture qui a atteint un degré de développement et d'influence comparable à celui des Romains et pourtant pas une once de notation linguistique. Et je pourrais continuer...

> « Le cœur de l'écriture bat dans le besoin de donner un nom à soi-même et aux éléments du monde »

En fait, État et écriture forment ce que j'appelle un mariage arrangé. La plus grande erreur est de faire de la bureaucratie le sens ultime de l'écriture. C'est une paresse intellectuelle, qui a voilé le sens de la plus grande invention du monde. Le cœur de l'écriture bat dans le besoin de s'ancrer à la terre qui nous soutient, dans la pressante nécessité de donner un nom, à soi-même et aux éléments du monde. » ■ **Propos recueillis par Vincent Glavieux**

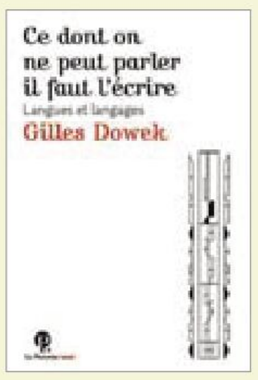
SUR LE MÊME THÈME



L'écriture raconte les langues...

SYNTHÈSE Un système d'écriture n'est pas qu'un véhicule pour le langage, mais il est indéniable que des traces écrites facilitent le travail quand il s'agit de reconstituer l'histoire d'une langue. C'est ce que nous démontre cette somme érudite et détaillée, qui reprend dans son découpage la frontière entre avant et après les inventions de l'écriture. Suivant par ailleurs les grandes zones géographiques du monde, elle se fixe pour mission d'*« informer, éclairer et guider le lecteur »* sur chaque langue *« suffisamment documentée pour que l'on puisse en raconter l'histoire »*, et le contexte dans lequel elle s'inscrit. Une synthèse de haut niveau. **V. G.**

Une histoire des langues et des peuples qui les parlent, Jean Sellier, La Découverte, 720 p., 32 €



Et les langages éclairent l'écriture

FORMULATIONS Dans cet essai, le chercheur en informatique et philosophe Gilles Dowek nous explique ce qui différencie une langue (les langues servent avant tout à communiquer) d'un langage (les langages sont des créations intentionnelles destinées à réaliser une tâche spécifique) et comment ceux-ci permettent aux sciences de faire des découvertes, de les expliquer et de formuler de nouveaux problèmes. Il y soutient aussi que l'écriture a d'abord été inventée pour transcrire non une langue mais un langage qui la précédait — celui que les Mésopotamiens utilisaient pour exprimer des nombres. Stimulant et bien vulgarisé. **V. G.**

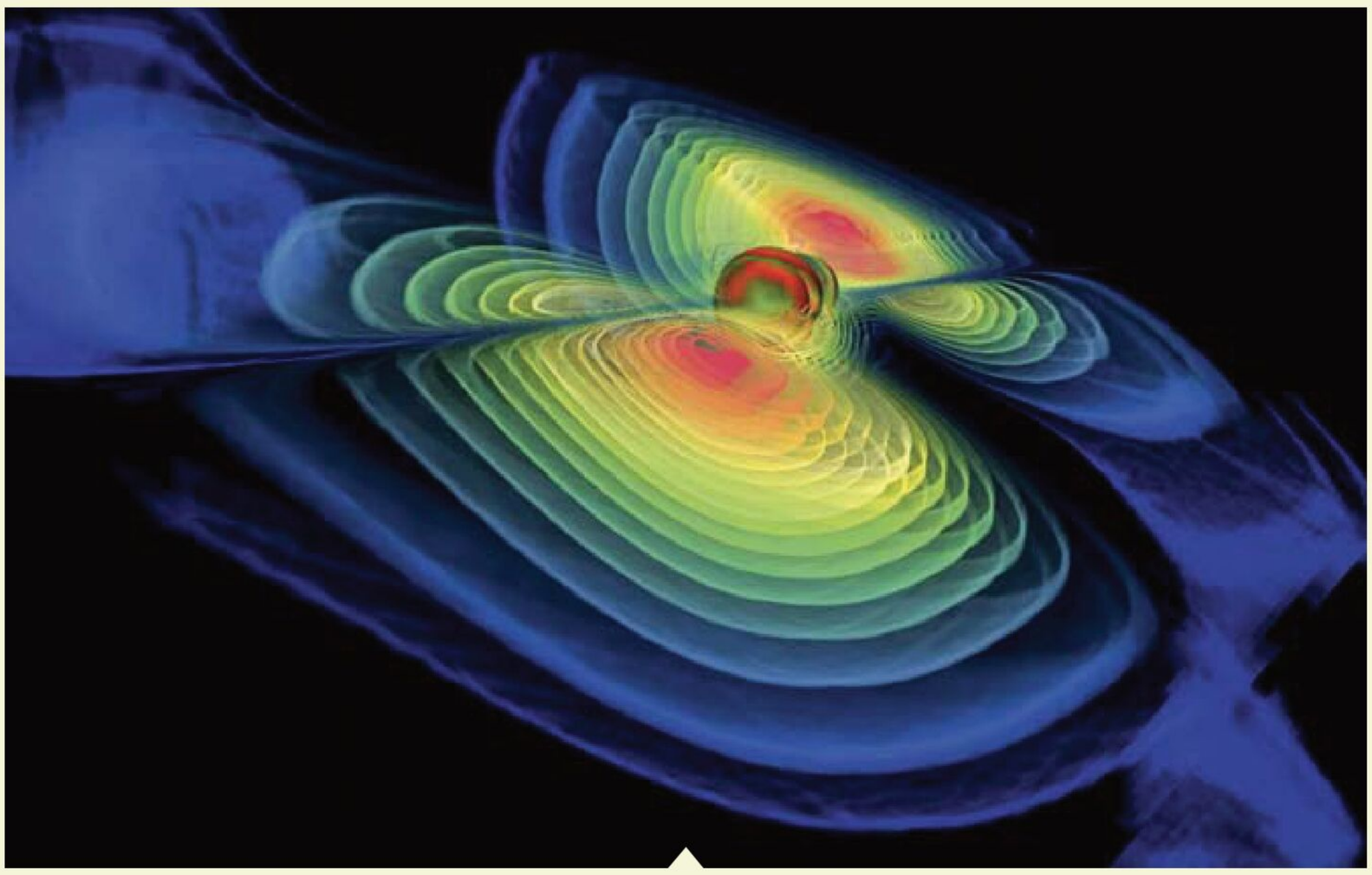
Ce dont on ne peut parler il faut l'écrire. Langues et langages, Gilles Dowek, Le Pommier, 216 p., 19 €

La phrase dans tous ses états

SYNTAXE Un sujet, un verbe, un complément, plus une majuscule au début et un signe de ponctuation à la fin : en apparence, la phrase française répond à une structure précise. Réunis autour de Gilles Siouffi, professeur en français classique et moderne à Sorbonne-Université (Paris), différents spécialistes nous montrent pourtant qu'elle est un objet grammatical mouvant, qu'elle a connu de multiples évolutions en douze siècles. Une histoire où l'écrit littéraire tient évidemment une grande place, mais où l'on s'intéresse également aux pratiques de la phrase dans les domaines religieux, politique, commercial, etc., ou aux questions sociales qu'elle soulève, en matière d'éducation. Surprenant. **V. G.**

Histoire de la phrase française : des Serments de Strasbourg aux écritures numériques, Gilles Siouffi (dir.), Actes Sud, 376 p., 39 €

C'EST À LIRE



LIGO

Sans le calcul infinitésimal, un phénomène comme les ondes gravitationnelles (ci-dessus) nous resterait inconnu.

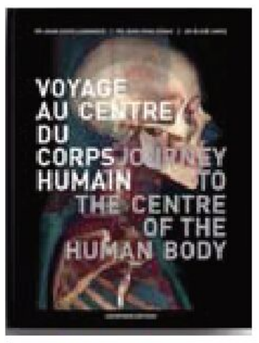
L'infini qui simplifie

Le mathématicien américain Steven Strogatz raconte l'histoire des outils de calcul fondés sur le principe de l'infini.

COMPRÉHENSION Si la notion de dérivée et d'intégrale vous impressionnait lors de vos années de lycéen — c'était mon cas —, ce livre est pour vous. Si au contraire la notion de variation d'une fonction vous rebutait, ce livre est quand même pour vous. Car le mathématicien américain Steven Strogatz parvient avec brio à raconter l'histoire de ces outils de calcul fondés sur le principe de l'infini : *« Pour faire la lumière sur une forme, un objet, un mouvement, un processus, ou un phénomène continu, quel qu'il soit — aussi insensé et complexe que cela paraisse —, reconcevez-le comme une partie infinie de parties plus simples, analysez ces dernières, puis réassemblez les parties pour donner un sens au tout de départ. »* C'est au XVIIIe siècle, autour de Newton et de Leibniz que se cristallise la théorie. Ils conceptualisent ce qui signifie couper en parties plus simples (notion de dérivée) et réassembler les parties (notion d'intégrale). Munis des outils de ce calcul infinitésimal qui étrangement simplifient la compréhension des choses, les scientifiques ont ensuite été parés pour appréhender les phénomènes les plus complexes, de l'électromagnétisme — description des ondes lumineuses — à la relativité générale — description de la gravitation par Einstein, dépassant justement celle qu'en fit Newton. Sans ces outils, outre la science moderne, toute la technologie qui nous entoure n'aurait pas vu le jour. Exit ordinateurs, imagerie médicale ou exploration spatiale… Et de fait, presque tous les phénomènes de la nature, des ondes électromagnétiques aux ondes gravitationnelles récemment détectées, s'expriment en termes d'équations différentielles (ou équations aux dérivées partielles lorsque plusieurs variables sont en jeu) de cette théorie. Un livre riche dont les explications mathématiques très abordables permettront, même à ceux qui n'aimaient pas les dérivées au lycée, de saisir la *« déraisonnable efficacité des mathématiques »* à modéliser le monde qui nous entoure. ■ **Philippe Pajot**

Puissance infini : comment le calcul infinitésimal révèle les secrets de l'Univers, Steven Strogatz, Quanto, 464 p., 24,50 €

Beau comme un scanner



IMAGERIE C'est en compagnie de trois pionniers et spécialistes d'imagerie médicale que la journaliste Cécile Coumau, par ailleurs collaboratrice de *Sciences et Avenir*, choisit de nous guider à travers les méandres du corps humain. Une exploration à la fois médicale et surtout artistique. Retraçant dans cet ouvrage bilingue les grandes étapes du *« tourbillon d'innovations »* qui n'a cessé de marquer le développement des outils d'imagerie médicale depuis plus d'un siècle, elle choisit de *« détourner notre regard »* au profit de l'émotion que peuvent provoquer ces clichés vus comme des œuvres à part entière. D'immenses planches en couleurs nous font ainsi voyager de notre tête à nos pieds, en IRM 3D, scanner 3D ou angiographie, non pour y déceler nos pathologies mais pour en révéler la beauté cachée. **C. C.**

Voyage au centre du corps humain, Pr Jean-Louis Lamarque, Pr Jean-Paul Sénac, Dr Elysé Lopez, Cécile Coumau, Archipress Éditions, 316 p., 69 €

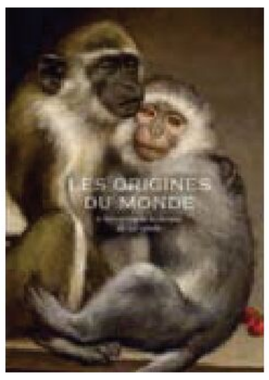
L'IA, pile et face

CONFRONTATION Il ne faut pas avoir peur de l'intelligence artificielle (IA). Elle est sous contrôle de l'humain, elle n'est qu'un outil. Ses capacités de calculs ouvrent de belles perspectives en matière de prédiction, d'analyse de données, de la médecine à l'urgence climatique. Oui mais… l'IA est une boîte noire. Ses algorithmes peuvent être biaisés et l'humain risque de ne plus pouvoir se passer de son aide. Les auteurs ont écrit non pas un mais deux livres, imprimés tête-bêche, l'un rassurant, l'autre plus inquiétant. Mais avec un même élément central : nos intercations avec l'IA. **A. D.**

L'Intelligence artificielle, avec ou contre nous ? Rodolphe Gelin et Olivier Guilhem, La Documentation française, 316 p., 7,90 €

Le siècle de la nature

RÉVOLUTION Catalogue d'exposition *(lire aussi p.98)*, mais aussi beau livre et ouvrage érudit d'histoire des sciences, *Les Origines du monde* invite à une fascinante plongée dans le XIXe siècle *« au moment où la relation de l'homme au monde naturel se transforme radicalement »* comme l'explique Laura Bossi, neurologue et historienne des sciences, commissaire de l'exposition du musée d'Orsay à Paris. Une trentaine d'auteurs livrent un fascinant récit d'une époque où la révolution dans la perception de la nature eut un impact immédiat sur les arts, la philosophie et toute la société en Europe. Avec Darwin comme pivot central, qui changea à jamais notre relation avec le mot « origines ». **M. N.**



Les Origines du monde, sous la direction de Laura Bossi, musée d'Orsay/Gallimard, 384 p. 45 €

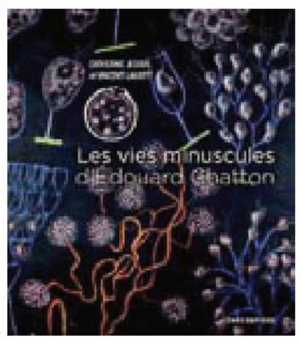
Mythes errants

RAMIFICATION Mythes du Soleil volé ou du Plongeon cosmogonique… Julien d'Huy, spécialiste de mythologie comparée, nous convie à une aventure fascinante : remonter à la racine de certains mythes complexes, ces récits explicatifs du monde rencontrés dans toutes les cultures. En recourant aux méthodes de classification de la phylogénétique, empruntées aux biologistes de l'évolution, comme aux outils statistiques, l'auteur parvient à corréler des mythes distants, à les ramifier à des troncs communs, à en suivre les diffusions, autant qu'à identifier des routes migratoires, jusqu'à remonter dans certains cas à la sortie d'Afrique de l'humain moderne! Passionnant. **B. A.**

Cosmogonie, la préhistoire des mythes, Julien d'Huy, La Découverte, 383 p., 22 €

Planches de vie

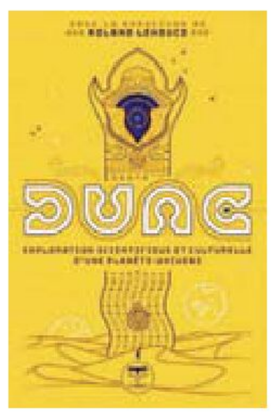
DESSINS DE SCIENCE Édouard Chatton (1883-1947) est un biologiste français. Il a dirigé la station de biologie marine de Banyuls-sur-Mer (Pyrénées-Orientales). Cet insatiable curieux des micro-organismes qui peuplent les océans, aurait pu tomber dans l'oubli si la qualité de ses dessins de science n'avait attiré l'œil de Catherine Jessus, directrice de recherche au CNRS, et Vincent Laudet, professeur de biologie marine à l'institut des sciences et de technologie d'Okinawa au Japon. Ils décident de les rassembler dans cet ouvrage, avec une biographie du savant et un panorama instructif de ses travaux. Un livre pour les amateurs d'art et de biologie. **M. G.**



Les Vies minuscules d'Édouard Chatton, Catherine Jessus et Vincent Laudet, CNRS Éditions, 284 p., 29 €.

« Dune » au prisme de la science

FRESQUE Fans de la saga romanesque *Dune*, commencée en 1965 avec l'ouvrage de Franck Herbert, ce livre est pour vous. Sous la direction de l'astrophysicien Roland Lehoucq, dix spécialistes, scientifiques, philosophes, linguistes ont disséqué différents pans de cette fresque au prisme de la science. Vers géants des sables, épice de longue vie, écologie d'un système dunaire, paradoxe de la prescience, ressources énergétiques de la planète..., ce livre est une mine d'informations pour relire *Dune* et pour comprendre également l'écologie et les politiques terrestres contemporaines. Chaque chapitre s'accompagne d'une bibliographie pour aller encore plus loin. **S. R.**



Dune, sous la direction de Roland Lehoucq, Le Bélial, 352 p., 18,90 €

Uber ou la malédiction Kalanick

ARRIVISME Ses clients adorent le service de voiturage d'Uber et la simplicité de son appli mobile. Mais en tant qu'entreprise, Uber est l'une des plus détestées au monde. À commencer par ses chauffeurs! La raison principale tient en deux mots : Travis Kalanick, le P-DG et cofondateur de cette société en 2009 dont la personnalité a façonné la culture interne de ce qui n'était au départ qu'une compagnie de voiturage de luxe. Ses pratiques et ses ambitions mèneront Uber au bord du gouffre. Affolé par la cascade de scandales, le conseil d'administration finira par se débarrasser de lui. Car Uber, c'est une histoire de coups fourrés, d'illégalité, d'argent flambé sans contrôle, de mépris, de jeu malsain avec les données personnelles. Journaliste économique au *New York Times*, Mike Isaac en fait un récit haletant, peuplé de managers immatures et arrogants laissant faire harcèlement moral et sexuel dans un climat social toxique. La chute de Travis Kalanick intervient comme un soulagement.

Arnaud Devillard

Supergonflé, la bataille Uber, Mike Isaac, Les Arènes, 510 p., 22,90 €

Un Goncourt dans les univers parallèles

PROBABILITÉ LIMITÉE En juin 2021, le vol 006 Paris-New York d'Air France traverse un immense cumulonimbus et une tornade de grêle. Endommagé, il demande du secours à l'aéroport Kennedy. Problème : un autre avion absolument identique a déjà atterri au même endroit… trois mois avant, avec les mêmes passagers. C'est le moment d'enclencher le protocole 42, imaginé par des chercheurs facétieux, pour répondre à des situations « à probabilité limitée » pouvant perturber le trafic aérien, telles qu'une invasion d'extraterrestres ou de zombies, la prise de contrôle par une IA… Les meilleurs scientifiques sont sommés de trouver une explication logique à la situation. Alors, s'agit-il d'un avion ayant emprunté un trou de ver pour passer d'un espace-temps à un autre ? D'une impression en 3D de matière biologique ? Ou sommes-nous des programmes au sein d'une simulation informatique créée par des êtres d'intelligence supérieure à la nôtre ? Le mathématicien et oulipien Hervé Le Tellier nous livre un récit virtuose, récompensé par le prix Goncourt, où l'on suit le parcours d'une poignée de passagers dont le destin sera bouleversé par la découverte de leur double. **Sylvie Rouat**

L'Anomalie, Hervé Le Tellier, Gallimard, 336 p., 20 €

C'EST À VOIR

EXPOSITIONS

En raison du contexte sanitaire actuel, n'oubliez pas de vous assurer de l'ouverture des lieux d'exposition avant de vous y rendre. Et retrouvez toujours notre guide des expositions virtuelles sur sciav.fr/guideexposvirtuelles

Bourges (18)

Wildlife Photographer of the Year
Comme chaque année, le muséum d'Histoire naturelle de Bourges présente cette prestigieuse exposition de photographies organisée par le Natural History Museum de Londres.
Muséum d'Histoire naturelle, Les Rives d'Auron, jusqu'au 8 mars. Rens. : 02.48.65.37.34.

La Rochelle (17)

Baleines, de Bangudae à La Rochelle
Les secrets des baleines, depuis les gravures préhistoriques du site coréen de Bangudae jusqu'aux recherches menées aujourd'hui dans les laboratoires de La Rochelle Université.
Muséum, 28 rue Albert Ier, jusqu'au 5 septembre. Rens. : 05.46.41.18.25.

Lyon (69)

L'oiseau rare, de l'hirondelle au kakapo
Disposant de la deuxième plus importante collection en France avec plus de 30 000 oiseaux, le musée des Confluences a sélectionné près de 240 spécimens pour donner à voir leur diversité et leur fragilité.

Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 2 janvier 2022. Rens. : 04.28.38.12.12.

Neuchâtel (Suisse)

Sauvage
À la rencontre des animaux sauvages avec un parcours sonore, un safari dans la réserve nationale de Masaï Mara au Kenya et des spécimens issus des collections du muséum (pangolin, lionne…).
Muséum d'Histoire naturelle, rue des Terreaux 14, jusqu'au 29 août. Rens. : +41(0)32.718.37.00.

Rouen (76)

Quand la Normandie était romaine : Briga, une ville retrouvée
Le bilan de dix ans de recherches à Eu (Seine-Maritime) révélant la genèse d'une ville antique aux origines gauloises, aux confins nord-ouest de l'Empire romain.
Musée des Antiquités, 108, allée François-Mitterrand, jusqu'au 16 mai. Rens. : 02.76.30.39.50.

Saint-Étienne (42)

Explore Mars
Un parcours conçu par la Cité de l'espace (Toulouse) à la suite du rover Curiosity, posé en 2012 sur Mars.
CCSTI La Rotonde, 158, cours Fauriel, jusqu'au 30 juin. Rens. : 04.77.42.02.78.

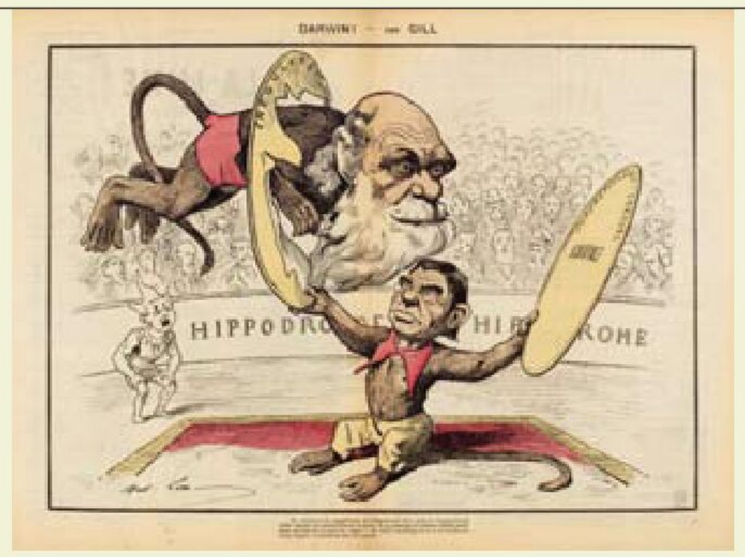
Toulouse (31)

Magies-sorcelleries
Mêlant collections historiques et dispositifs magiques du muséum de Toulouse et du musée des Confluences de Lyon, cette exposition explore l'universalité et l'intemporalité des magies.
Muséum de Toulouse, 35, allées Jules-Guesde, jusqu'au 31 octobre. Rens. : 05.67.73.84.84.

Vaulx-en-Velin (69)

Astronautes
Produite par la Cité de l'espace (Toulouse), cette exposition invite à expérimenter la vie des astronautes, rythmée de 16 levers et couchers de Soleil par jour dans la Station spatiale internationale (ISS).
Planétarium, place de la Nation, du 16 janvier au 2 janvier 2022. Rens. : 04.78.79.50.13.

Le Paradis terrestre. Adam et Ève et les animaux de la Création. Isaak Van Oosten (1613-1661).

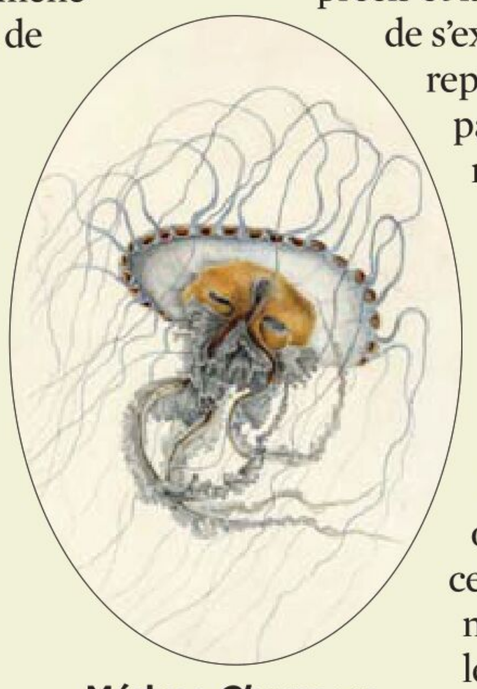


Caricature de Charles Darwin et d'Émile Littré, *La Lune rousse,* André Gill (1840-1885).

Paris (75) /Exposition

Les origines du monde

C'est une véritable exposition d'histoire des sciences qui s'est installée dans l'ancienne gare d'Orsay. Un projet ambitieux mené pendant trois ans sous la direction de Laura Bossi, neurologue et historienne des sciences, en partenariat avec le musée des Beaux-arts de Montréal (Canada) — où l'exposition sera présentée ensuite. En résulte une fascinante exploration de « l'invention de la nature au XIXe siècle ». Un siècle qui a vu la théorie darwinienne bouleverser la place de l'humain dans la nature comme sa relation avec les autres animaux. Une révolution qui bouleversera sur toute la société et en particulier sur les artistes. En ce sens, cette exposition n'est pas une confrontation « arts et sciences » mais l'évocation d'une transformation mutuelle des arts et des sciences. Le beau rejoint le précis et la rigueur permet à l'imagination de s'exprimer. Le parcours part des représentations du monde biblique, passe par les premières reproductions fidèles d'animaux et de plantes à la Renaissance, puis par l'inventaire du vivant au XIXe siècle pour conduire à l'élan nouveau insufflé par la théorie de l'évolution. Qui repense la beauté animale, l'expression de celle de la nature ou la quête des origines. Jusqu'à ce que les artistes refusent la naturalisation de l'humain et le scientisme, ouvrant la voie à l'art abstrait. **Mathieu Nowak**



Méduse *Chrysaora*, aquarelle et crayon sur vélin, Charles-Alexandre Lesueur (vers 1808/1810).

Musée d'Orsay, 1, rue de la Légion-d'Honneur, jusqu'au 2 mai. Rens. : 01.40.49.48.14.

LE HAVRE, MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE - MBA, RENNES, DIST. RMN-GRAND PALAIS/L. DESCHAMPS - PARIS MUSÉES/MUSÉE CARNAVALET

Retrouvez toutes les expositions dans notre guide Internet : **sciav.fr/guideexpos**

LE CIEL DE FÉVRIER

PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

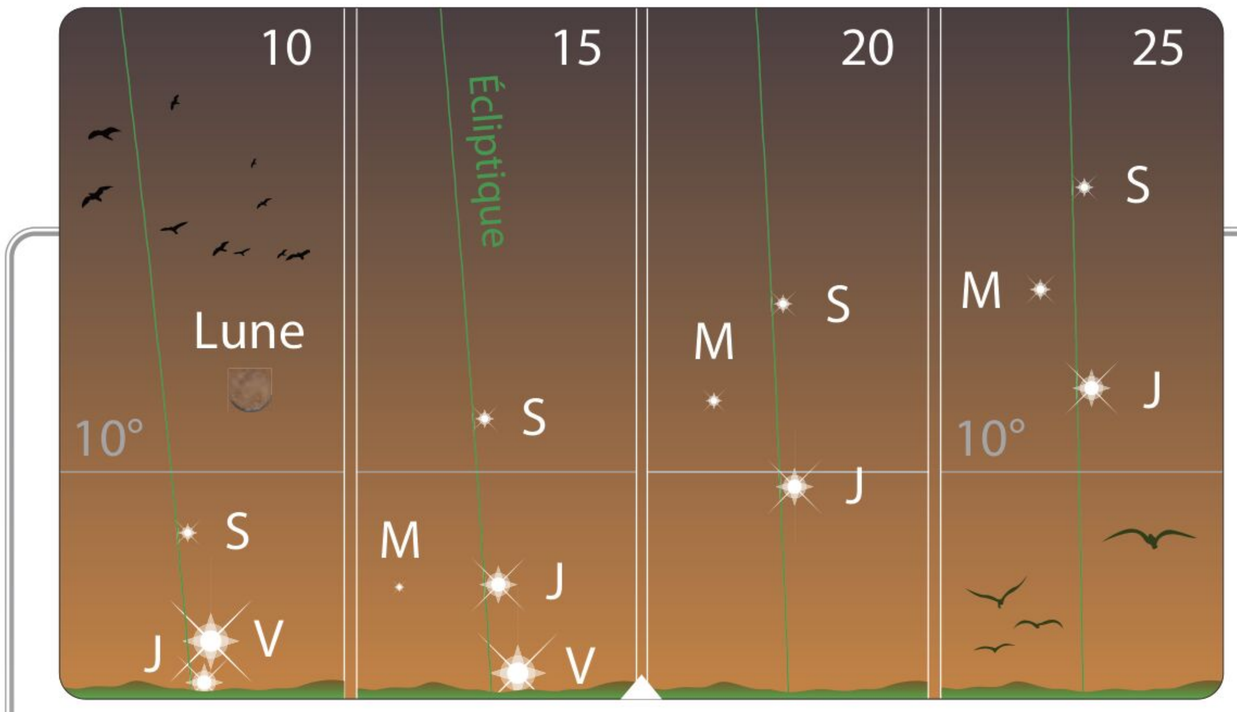
MERCURE La petite planète passe en conjonction inférieure le 8 et se trouve alors dans la direction du Soleil. Bien qu'en fin de mois, elle soit à une distance angulaire respectable de l'astre du jour (plus de 26° le 28), elle demeure beaucoup trop basse dans les lumières du levant pour être observable dans de bonnes conditions. La faute en revient à l'écliptique (la projection sur la sphère céleste du plan dans lequel circulent les planètes autour du Soleil), alors très peu incliné sur l'horizon.

VÉNUS L'étincelante étoile du Berger, comme Mercure, n'est pas visible ce mois.

MARS La planète Rouge est observable le soir vers le sud, à une soixantaine de degrés de hauteur. Elle entame ensuite sa lente descente vers le couchant et passe sous l'horizon en milieu de nuit. Mars est un point à la couleur légèrement caramel, dont l'éclat diminue d'un tiers au cours du mois. Elle quitte la constellation du Bélier pour celle du Taureau dans la nuit du 23 au 24.

JUPITER Pour les mêmes raisons que Mercure, la plus grosse des planètes n'est pas visible ce mois.

SATURNE Proche de Jupiter en direction, la planète aux anneaux n'est pas non plus observable en février… du moins, sous nos latitudes.



Aspect du ciel sur l'île de La Réunion les 10, 15, 20 et 25 février, une demi-heure avant le lever du Soleil. Les planètes Mercure, Vénus, Jupiter et Saturne sont désignées par leur initiale.

Bal de planètes matinal à La Réunion

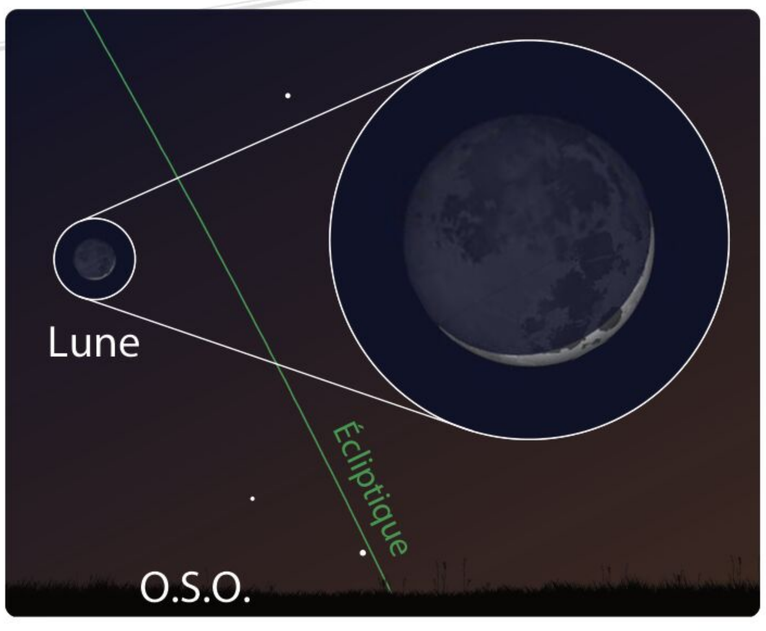
PRÈS DU TROPIQUE DU CAPRICORNE, la situation est bien plus favorable qu'en métropole pour apercevoir les planètes ce mois-ci. À La Réunion, par exemple, le matin, la quasi-verticalité de l'écliptique permet d'observer facilement Mercure, Jupiter et Saturne en seconde partie de mois.

Notre conseil Tournez-vous vers le levant. Autour du 10, admirez la Lune en forme de barque puis, au fil des jours, la lente montée de Jupiter et Saturne au-dessus de l'horizon. Mercure, dont l'éclat va croissant, se joint au duo. Sa position varie sensiblement en quelques jours par rapport aux deux planètes géantes.

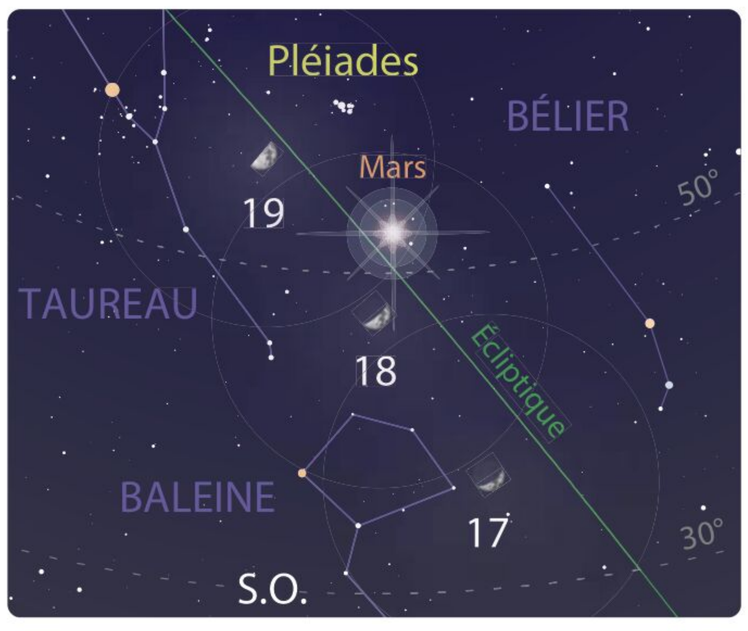
Retrouvez la carte du ciel sur sciav.fr

L'appli du mois

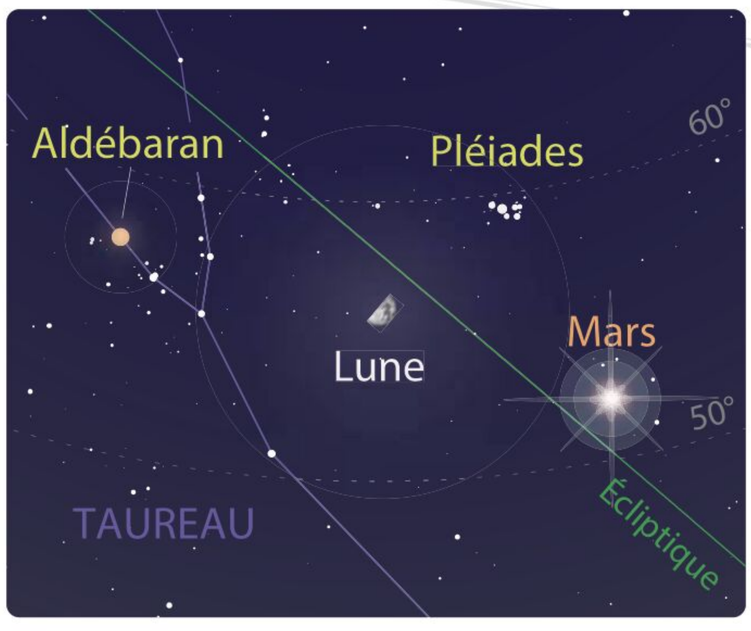
MOON PHASE CALENDAR est une application gratuite en français fonctionnant sous Android. Elle propose non seulement un calendrier des phases lunaires mais aussi des informations sur la Lune (aspect actuel, heures de lever et de coucher, dates des phases à venir) et sur le Soleil (longueur du jour, heures et durées des différents crépuscules).



LE 14, 2 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, contemplez le croissant de Lune et sa subtile lumière cendrée, résultant de l'illumination de notre satellite par un puissant clair de Terre.



LE SOIR DU 18, UNE LUNE AU CROISSANT déjà très affirmé passera à 5° au sud de la planète Mars, haut dans le ciel et aux confins des constellations du Bélier et du Taureau.



LE SOIR DU 19, LA LUNE EN PREMIER QUARTIER se trouvera à mi-chemin entre Mars et Aldébaran. La planète et l'étoile partagent la même couleur et, en ce moment, le même éclat.

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

ASTROPHYSIQUE

Un trou noir peut-il en absorber un autre ?

Nathanaël Z.

Oui ! Deux trous noirs peuvent entrer en collision, ce qui donnera naissance à un trou noir unique. Celui-ci sera plus léger que la somme des deux autres. Le reste de la masse est converti dans les célèbres ondes gravitationnelles que l'on a détectées pour la première fois en 2016. L'événement correspondait à la fusion de deux trous noirs de masses respectives de 29 et 36 fois celle du Soleil. Elle avait donné naissance à un gigantesque trou noir d'une masse de 62 masses solaires, tandis que l'équivalent de 3 masses solaires avait été expulsé sous forme d'ondes gravitationnelles. Depuis, ces détections ne cessent de se succéder. En 2020, ce fut le cas d'une fusion de deux trous noirs très différents : l'un était presque quatre fois plus massif que l'autre. ■

M. N. @mathieu_nowak

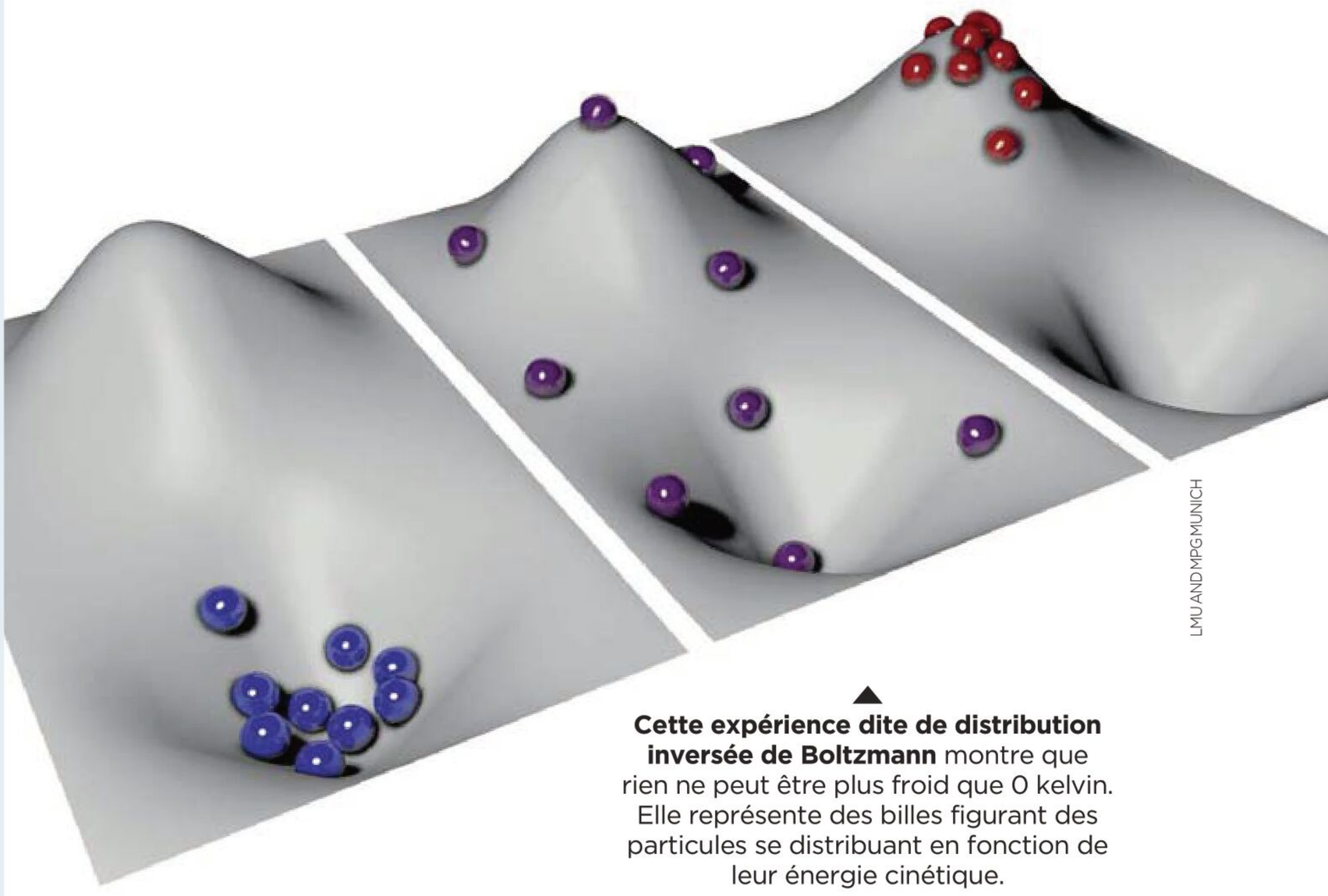
TAXONOMIE

Les champignons sont-ils des plantes ?

Marie T.

Non : depuis 1969, ils constituent un règne à part, les *fungi*, aux côtés des végétaux, des animaux, procaryotes (organismes unicellulaires sans noyau comme les bactéries) et des protistes (unicellulaires avec noyau, comme les amibes). Malgré leur apparence, ils partagent plusieurs caractéristiques des animaux. Ils n'ont par exemple pas de chlorophylle permettant la photosynthèse et se nourrissent de la matière organique contenue dans leur environnement (*voir* S. et A. *hors-série n° 179*). De plus, les champignons n'ont ni tige ni feuilles, ni même de racines, mais sont faits de filaments appelés mycélium. Mais l'avènement de la génétique a permis de rapprocher certains champignons des plantes, et d'autres des animaux. Le débat de la classification n'est donc pas clos !

C. G. ■ @CamilleGaubertb



LMU AND MPG MUNICH

Cette expérience dite de distribution inversée de Boltzmann montre que rien ne peut être plus froid que 0 kelvin. Elle représente des billes figurant des particules se distribuant en fonction de leur énergie cinétique.

PHYSIQUE

Peut-on aller en dessous du zéro absolu ?

Lofti O.

Rien ne peut être plus froid que le zéro absolu, c'est-à-dire -273,15 degrés Celsius (°C) ou 0 kelvin (K) : c'est l'un des piliers de la physique, qui correspond à l'état des particules au niveau d'énergie minimale. Cela se traduit par une totale immobilité au sens classique. Cependant, il peut exister des températures négatives en dessous de ce zéro absolu. Cela a été démontré par Simon Braun, de la Ludwig-Maximilians Universität (Allemagne) au cours d'une expérience menée en 2013. Pour la comprendre, il faut savoir que la température d'un corps est proportionnelle à l'énergie cinétique (celle du mouvement) moyenne des particules qui le composent. Mais toutes les particules n'ont pas la même énergie cinétique, celle-ci est distribuée. La majorité des particules reste à un niveau d'énergie faible et un petit nombre seulement s'agite fortement, ce qui crée de la chaleur. En physique, cette répartition est appelée distribution de Boltzmann. L'équipe de physiciens allemande est parvenue à inverser la distribution de Boltzmann dans un gaz dont la température avoisinait le 0 K. Dans leur gaz, de nombreuses particules possédaient de hauts niveaux d'énergie et seulement quelques-unes étaient immobiles. « *La distribution de Boltzmann inversée est la marque d'une température absolue négative, et c'est ce que nous avons accompli* », explique Ulrich Schneider, un des auteurs de l'étude. Pourtant, ce gaz n'est pas plus froid que zéro kelvin, mais plus chaud : « *Il est encore plus chaud que n'importe quelle température positive* », conclut le chercheur. ■

Joël Ignasse @IgnasseJ

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 887, janvier 2021

Les séries d'Alphabégore

Nos solutions (non nécessairement uniques)
1 : D n'offre pas de symétrie verticale
2 : F n'est pas un chiffre romain
3 : F n'est pas l'initiale d'un des quatre premiers nombres dans l'ordre : Un - Deux -? - Quatre
4 : W n'appartient pas à l'alphabet cyrillique
5 : Sur le clavier AZERTY,
H ne se trouve pas sur la même ligne

De l'Avenir à l'Espace

A	V	E	N	I	R
R	A	C	I	N	E
C	A	R	E	N	E
E	C	R	A	S	E
E	S	P	A	C	E

Le magot de Timothée

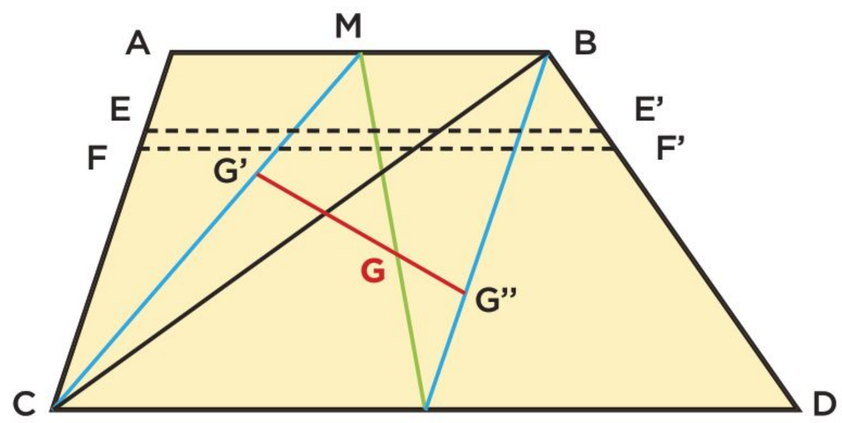
Soit M le magot initial. Après le premier achat, il reste 3/5 de M. Après le deuxième achat, il reste la moitié de 3/5 soit 3/10 de M. Après le troisième, il reste le 1/3 de ces 3/10 soit (1/3) x (3/10) soit 1/10. Ce 1/10 de M vaut 5 € donc M valait 50 €.
Le premier achat était de 2/5 de 50 soit 20 €, le deuxième, la moitié du reste qui vaut 30 donc 15 € et le troisième les 2/3 de 15 soit 10 €.
Nous avons bien 20 + 15 + 10 + 5 = 50.

Dodéca-référente ?

0 4	6 1	A	0	B	2
1 4	7 3	A	1	7	A
2 5	8 0	9	9	A	B
3 2	9 2	A	0	0	B
4 2	A 6	1	B	7	3
5 2	B 5	1	A	7	B

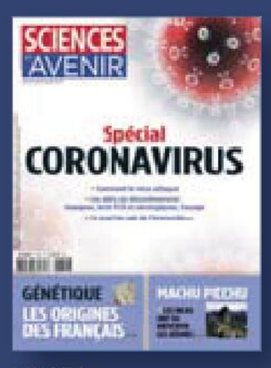
Trapèze et gravité

Soit la surface trapézoïdale ABCD.
Décomposons-la par des parallèles aux bases AB et CD en une infinité de surfaces EFE'F', assimilables à des droites. Le centre de gravité de ces droites est en leur milieu, donc le centre de gravité du trapèze est sur la ligne MN qui joint les milieux des bases. Menons la diagonale BC, elle décompose le trapèze en deux triangles dont les centres de gravité G' et G" sont sur les médianes CM et BN des triangles ABC et BCD, au tiers de chacune d'elles à partir de M et de N. le centre de gravité du trapèze se trouve sur la ligne G'G", il est donc en G, intersection de cette droite avec MN. On obtiendrait le même résultat avec la diagonale AD.



Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous


N° 879
Spécial coronavirus

N° 880
Covid-19 : ce dont on est sûr

N° 881/882
Les nouvelles découvertes

N° 883
Les secrets de l'antimatière

N° 884
Hérédité, ce que révèlent les tests

N° 885
Guérir avec la génétique

N° 886
L'IA au service de l'intelligence humaine

N° 887
La fin de l'Univers

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : **7 €** par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :
Sciences et Avenir - service des abonnements
45 av. du Général-Leclerc
60643 Chantilly Cedex

❑ N° 879 ❑ N° 880 ❑ N°881/82 ❑ N° 883
❑ N° 884 ❑ N° 885 ❑ N° 886 ❑ N° 887

❑ **Commandez une reliure pour 11 numéros : 15 €**

Nom : . . . . . .
Adresse : . . . . . .
. . . . . Ville : . . . . . .
Code postal : . . . . . .

Débris spatiaux : l'épée de Damoclès

Pierre Omaly (Cnes) et Luisa Innocenti (ESA), tous deux spécialistes de la surveillance des débris orbitaux, expliquent comment l'arrivée d'opérateurs commerciaux multiplie les risques de collision entre les satellites autour de la Terre.

Dialogue animé par Sylvie Rouat @srouat1

En octobre 2020, un morceau de fusée et un ancien satellite ont frôlé la collision. Ce risque spatial est-il fréquent ?

Pierre Omaly : Il y a autour de la Terre quelque 34 000 objets, dont 25 000 suivis avec précision. Leur trajectoire étant connue, il est possible de déterminer les probabilités de collision. Le 18e escadron de contrôle spatial de l'armée américaine, basé en Californie, publie quotidiennement plus de 2000 probabilités de collisions. Il faut ensuite affiner les modèles et si le risque de collision est avéré, manœuvrer pour éviter l'accident. C'est très fréquent. Dans ce cas précis, il s'agissait de deux débris, impossibles à manœuvrer.

Que s'est-il passé en septembre 2019, lorsque a été émise une alerte concernant le satellite européen Aeolus et l'un des engins de la constellation américaine Starlink ?

Luisa Innocenti : Pour des satellites opérationnels, il est d'usage de contacter l'autre opérateur afin de coordonner les manœuvres. Entre agences spatiales, on sait qui appeler. Là, il s'agissait d'un opérateur privé, SpaceX. Les ingénieurs de l'Agence spatiale européenne (ESA) ont recherché un contact sur Internet. Un message a été envoyé à une adresse commerciale, mais personne n'a répondu. Il a donc été décidé d'effectuer la manœuvre unilatéralement, sans savoir ce que l'autre allait faire. Avec l'arrivée de nouveaux opérateurs commerciaux sur le marché spatial, il va falloir mettre en place un annuaire partagé.

La mise en orbite de constellations de dizaines de milliers de satellites vous inquiète-t-elle ?

P. O. : Oui, on assiste à un changement de philosophie. La constellation Starlink dispose déjà de près de 900 satellites : c'est bien plus que tous ceux lancés par l'Europe depuis le début de l'ère spatiale !

L. I. : Avant l'arrivée de Starlink, une centaine d'objets était mise en orbite par an. Si du jour au lendemain, on lance des milliers d'objets chaque année, on change d'échelle. La réglementation dit qu'un satellite en fin de vie doit être désorbité avant 25 ans. Mais seuls 20 % des objets sont désorbités de manière active. Un satellite a une grande valeur, et son opérateur l'utilise souvent jusqu'au bout. Une fois en panne, on ne peut plus le désorbiter. Selon son altitude, il peut rester jusqu'à 200 ans dans l'espace. Les satellites placés sur les orbites les plus basses descendent doucement sous l'action de la gravité et rentrent ainsi dans l'atmosphère. C'est le cas de 40 % des engins en fin de vie, et de ceux de Starlink en panne. SpaceX construit des satellites rapidement mais connaît aussi un grand nombre d'échecs. Le choix de l'orbite basse a sans doute été fait pour faciliter leur désorbitation. Va-t-il demain opter pour des orbites plus hautes ?

P. O. : Il semble qu'à ses débuts, l'opérateur ait fait une demande d'utilisation d'orbites plus élevées. Mais l'autorisation étant demandée pour

BUTLER, CHRIS

Du satellite en panne aux restes de lancements ratés, des débris de toutes tailles orbitent autour de la Terre (illustration).

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

Pierre Omaly est chargé de la sécurité des vols spatiaux de l'agence spatiale française (Cnes) au départ de Kourou (Guyane). Il est également en charge de l'étude et de la surveillance depuis Toulouse des débris orbitaux.

Luisa Innocenti dirige les activités de « nettoyage » des orbites terrestres à l'Agence spatiale européenne (ESA). Elle est aussi ambassadrice des bonnes conduites essentielles aux activités spatiales.

Notre journaliste **Sylvie Rouat** (en haut).

12 000 objets, l'organisme américain de régulation l'a incité à réduire l'altitude autour de 500 km. En fait, certains satellites Starlink sont déjà sur des orbites plus basses : ceux qui sont en panne ou qui testent leur capacité à brûler dans l'atmosphère. Ces objets sont bien visibles en début et fin de nuit à l'oeil nu et constituent pour les astronomes une pollution lumineuse du ciel.

Va-t-on bientôt devoir les nettoyer ?

L. I. : Peut-être. L'ESA a ainsi signé en décembre dernier un contrat avec la start-up suisse ClearSpace pour le premier enlèvement d'un débris spatial. Cette société s'appuie sur un consortium d'entreprises européennes. Il s'agit de désorbiter un étage du lanceur Véga de 2 mètres de diamètre, 1 mètre de haut et 100 kg. L'objectif est de mettre l'industrie européenne en position de force sur le futur marché de nettoyage des orbites.

P. O. : Il y a d'autres initiatives, telle celle d'Astroscale, un consortium basé au Japon qui propose également de désorbiter des objets en orbite basse ou, comme l'a récemment réalisé l'américain Northrop Grumman, d'envoyer un engin en orbite géostationnaire pour prolonger la vie d'un satellite à court de carburant. Les constellations, surtout, seront leurs premiers clients. Une constellation, ce sont en effet des milliers de satellites évoluant sur une même orbite. Dans ce système complexe, un engin à la dérive menacerait toute la constellation. Les opérateurs ont tout intérêt à en extraire les objets déficients.

A-t-on des solutions pour les petits débris ?

P. O. : Pas vraiment... Il y a eu deux événements majeurs en la matière. En janvier 2007, un tir de missile chinois a détruit un satellite désaffecté à 800 km d'altitude. Une catastrophe ! Aujourd'hui encore, 50 % des manœuvres d'évitement réalisées par le Centre national d'études spatiales (Cnes) sont liées à cet événement. La deuxième ▶

« L'accident entre le satellite américain Iridium-33 et le russe Cosmos-351, en 2009, a doublé la quantité de débris de plus de 10 cm en orbite »
Pierre Omaly

marche a été franchie en 2009, avec la collision des satellites américain Iridium-33 et russe Cosmos-2251. Cette collision a doublé la quantité de débris de plus de 10 cm en orbite disséminant un essaim d'objets de petites tailles hors de contrôle. À cela s'ajoutent les explosions de satellites éteints qui passent continuellement de l'ombre au soleil : leurs matériaux se dilatent, se contractent, se fissurent et l'engin finit par exploser. C'est ce type de déchets qu'il faut retirer d'urgence. Pour les petits débris, il faut travailler en amont et concevoir des engins dont le moteur de désorbitation serait protégé lors d'un impact. Nous travaillons sur des blindages, des systèmes d'arrêt des débris. Reste qu'un débris de plus de 1 cm filant à 14 km par seconde engendrera des énergies colossales lors de l'impact. Les blindages ne peuvent absorber les chocs avec des débris de plusieurs centimètres.

L. I. : Les scientifiques préconisent d'enlever en priorité les gros débris, qui ont plus de risques d'être percutés. Revenons sur la collision entre Iridium-33 et Cosmos-2251, ce dernier étant un débris. La société commerciale Iridium avait été alertée du risque de collision. Mais manœuvrer signifiait payer des opérateurs et perdre une semaine d'opération du satellite. Ses dirigeants ont pris la (mauvaise) décision de ne rien faire. Ensuite, ils ont voulu se retourner contre les Russes. Mais la demande de réparation ne pouvait aboutir, puisqu'ils étaient seuls à avoir la maîtrise de leur satellite. Depuis, tout le monde a retenu la leçon et prend soin de réaliser les manœuvres à temps.

2020 a également vu la Station spatiale internationale (ISS) manœuvrer trois fois pour éviter un débris. Est-ce banal ?
L. I. : Il y a quelques années, cela ne se produisait jamais. Désormais, la manœuvre doit être faite deux à trois fois par an pour éviter des objets de plus de 10 cm, la protection de l'ISS étant assurée jusqu'à cette taille.

P. O. : L'ISS descend naturellement. On essaie donc d'intégrer ces manœuvres dans un plan global d'ajustement de son orbite. Lorsque l'on détecte un risque de collision, on rehausse la station à l'avance pour ne pas perdre du temps opérationnel et en même temps la maintenir à la bonne altitude.

Qu'en est-il de l'orbite géostationnaire à 36 000 km d'altitude ?
L. I. : Elle est également encombrée. Pour cette orbite, on a créé des orbites cimetières. Un satellite en fin de vie doit remonter à 200 km plus haut, ou descendre 200 km plus bas. Les emplacements sur cette orbite ont une grande valeur en raison des fréquences qui leur sont associées. Aussi 70 % des manœuvres de nettoyage y sont-elles réalisées.

Plus de 2000 probabilités de collisions sont publiées chaque jour par le 18e escadron de contrôle spatial américain (ici illustration de l'orbite stable encombrée de déchets spatiaux).

Les débris qui rentrent dans l'atmosphère ont-ils déjà été assimilés à une menace militaire ?
P. O. : Les gros objets sont catalogués et l'on peut prédire leur rentrée dans l'atmosphère. Il n'y a donc pas de surprise.

L. I. : Il est plus probable que ces retombées aient engendré de l'incompréhension de la part des populations qui les ont associées aux extraterrestres. C'est incongru de trouver au milieu de la savane africaine ou des landes une coiffe de lanceur.

Quelle est la plus importante menace que font peser ces débris sur l'avenir du spatial ?
L. I. : Une collision entre deux gros débris ! Cela créerait un nuage de débris et provoquerait des collisions en chaîne. C'est le fameux syndrome de Kessler, du nom d'un scientifique américain qui a défini un palier au-delà duquel nous ne pourrons plus utiliser certaines orbites. L'artiste néerlandais Daan Roosegaarde prédit lui qu'un jour nous ne pourrons plus quitter la Terre, tenus en cage par

LE + NUMÉRIQUE
À VOIR : la version intégrale du débat en vidéo sur notre site **www.sciencesetavenir.fr/videos**

JOHAN SWANEPOEL

des nuages de débris. Je ne crois pas à cette extrémité, mais l'homme n'a de fait pas intégré la gestion des débris sur terre, dans les océans ou dans l'espace. J'ai l'espoir que les nouvelles générations seront plus sensibles à cette question.

P. O. : Des clusters d'étages de lanceurs ont été identifiés. Pendant la guerre froide, Russes et Américains envoyaient en moyenne un lanceur par semaine. Il y a des orbites sensibles, vers 600 km d'altitude, où ces gros débris se croisent plusieurs fois par jour. C'est une véritable épée de Damoclès. Un accident se produira forcément un jour. D'autant que la courbe d'évolution des débris a exactement la même géométrie et dynamique que celle du réchauffement climatique : elles grimpent de plus en plus vite. Jusqu'à quand ? Seul un espace « vert » assurera la pérennité de nos activités dans l'espace et dans notre quotidien. ■

« La pire menace est une collision entre deux gros débris qui entraînerait une réaction en chaîne »

Luisa Innocenti

PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA *

Faut-il interdire la reconnaissance faciale ?

Grâce aux progrès de l'intelligence artificielle, on fabrique des machines capables de reconnaître les visages et d'y déceler nos émotions. Certains affirment même qu'elles deviendraient physiognomonistes en cela qu'elles détermineraient le caractère des personnes. Introduite au XVIIIe siècle par le théologien suisse Johann Caspar Lavater, la physiognomonie prétend établir un lien entre psychisme et traits du visage. Cette pseudoscience influença le médecin et criminologue Cesare Lombroso qui défendit, dans *L'Homme criminel* (1876), la thèse selon laquelle il existerait une prédisposition à la délinquance que trahiraient nos traits. De telles conceptions paraissent datées. Pourtant, l'université de Harrisburg (États-Unis) a récemment déclaré que ses chercheurs avaient conçu un logiciel anticipant une prédisposition au comportement criminel. En 2017, une équipe de psychologie sociale de l'université de Stanford (États-Unis) a décrit un logiciel devinant au faciès l'orientation sexuelle. Il semble aussi que les autorités de la province chinoise du Xinjiang utilisent la reconnaissance faciale pour surveiller les Ouïghours. Tout cela a conduit certains industriels, comme IBM, à suspendre leurs recherches sur les applications dédiées à la surveillance de masse, et des parlementaires à demander un moratoire.

> « Il faudrait empêcher ses utilisations illégales et contraires aux droits fondamentaux »

Toutefois, en dépit de ces utilisations délétères, cette technologie se révèle très utile pour l'authentification, afin d'éviter le piratage et le vol d'identité ; la conception d'interfaces souples fondées sur l'analyse des émotions ; l'indexation des archives visuelles faites d'innombrables films, vidéo et émissions de télévision ; la facilitation des enquêtes policières, sur requête de magistrats. Il ne faudrait pas la condamner en tant que telle, mais empêcher ses utilisations illégales et contraires aux droits fondamentaux. ■

*Président du comité d'éthique du CNRS, professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS).
Dernier ouvrage publié : *Le Mythe de la singularité. Faut-il craindre l'intelligence artificielle ?* Le Seuil, 2017.

BRUNO LÉVY

PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

Altitudes

		3				4
	1					
		5				
		2				
				7		
	6					5

Dans cette région, chaque case a une altitude notée de 1 à 7. Dans chaque ligne et chaque colonne, les altitudes sont toutes différentes. Les cases bleues (creux) sont d'altitude moindre que toutes les cases voisines (droite-gauche et haut-bas), de même que les cases rouges (pics) ont une altitude supérieure à leurs voisines (droite-gauche et haut-bas). Les voisinages en diagonale ne comptent pas. Les cases blanches voisinent soit avec des bleues plus basses, des rouges plus hautes ou des blanches quelconques. Retrouvez l'altitude de chaque case.

Grinceurs ou souquets ?

Il ressort de la lecture du mode d'emploi de ma nouvelle machine et de mes efforts pour en déduire une conclusion réaliste, quatre informations essentielles :
- Tous les grinceurs sont aussi des souquets
- Rien à faire pour trouver un parfile qui ne soit pas un turbon
- Attention : certains souquets ne sont pas turbons
- Quand on pense aux parfiles, cela inclut évidemment les souquets.

Quel est le nombre maximum de ces affirmations pouvant coexister dans la vérité ?

Couples

Dans une certaine communauté il y a 1000 couples mariés. 2/3 des maris qui sont plus grands que leur femme sont aussi plus lourds. 3/4 des maris qui sont plus lourds que leur femme sont aussi plus grands.
S'il y a 120 femmes qui sont plus grandes et plus lourdes que leur mari, combien de maris sont à la fois plus lourds et plus grands que leur femme ?

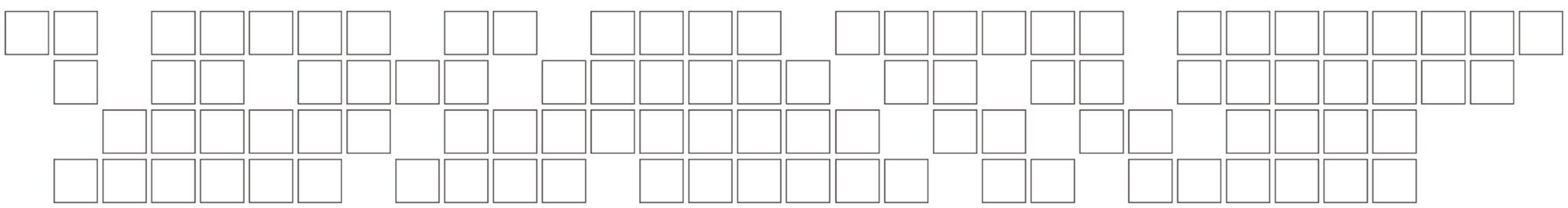
Le poids des planches

Les deux pièces de Molière :
Les Précieuses ridicules ;
Le Malade imaginaire
s'écrivent chacune avec 9 lettres de l'alphabet, aux accents près, bien que ce ne soient pas les mêmes 9 lettres pour les deux pièces.
Si chaque pièce attribue à chacune de ses lettres utilisées un poids différent allant de 1 à 9, laquelle peut peser le plus lourd ?

Asimov au goutte-à-goutte.

Laissez tomber chaque lettre verticalement dans une case pour écrire une citation d'Isaac Asimov.

U A P A A B E F R E E H P E A I N E E I A E N D A E G E A N T E
H U M O I I T S N E R M E T P O S N Q T E R N A E S E E N T
N U N S N T O I T U E U T R P O R U U U R N T R I
R S O P M X T T T T R



Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

33 GRANDS TITRES DE PRESSE PRIX IMBATTABLE !

BULLETIN D'ABONNEMENT ÉTUDIANT

A renvoyer complété et accompagné de votre règlement, sous enveloppe non affranchie à :
RUE DES ETUDIANTS - LIBRE REPONSE 82532 - 75803 PARIS CEDEX 08

1. COCHEZ LE OU LES ABONNEMENTS QUE VOUS CHOISISSEZ

ACTUALITÉ INTERNATIONALE

- ☐ **Courrier international** | Hebdomadaire | 26 nos
- ☐ **Time** | Hebdomadaire | 35 nos
- ☐ **Le Monde diplomatique** | Mensuel | 12 nos
- ☐ **Vocable** | Bimensuel | 21 nos
  ☐ Anglais ☐ Allemand ☐ Espagnol (cochez l'édition choisie)

ACTUALITÉ GÉNÉRALE

- ☐ **Le Monde Sélection hebdomadaire** Hebdomadaire | 26 nos
- ☐ **Alternatives Economiques** | Mensuel | 11 nos
- ☐ **L'Obs** | Hebdomadaire | 26 nos
- ☐ **Le 1** | Hebdomadaire | 39 nos
- ☐ **Politis** | Hebdomadaire | 18 nos + web illimité + 1 hors-série en version num
- ☐ **Society** | Bimensuel | 24 nos

CULTURE GÉNÉRALE

- ☐ **L'éléphant** | Trimestriel | 3 nos
- ☐ **Sciences Humaines** | Mensuel | 11 nos
- ☐ **Philosophie magazine** | Mensuel | 8 nos
- ☐ **Zadig** | Trimestriel | 3 nos
- ☐ **Papiers** | Trimestriel | 4 nos

SCIENCES

- ☐ **Sciences et Avenir** | Mensuel | 10 nos + 1 n° double + 4 hors-séries
- ☐ **Science & Vie** | Mensuel | 12 nos + web illimité
- ☐ **Sport & Vie** | Bimestriel | 6 nos + 2 hors-séries

DÉBATS

- ☐ **L'Economie politique** | Trimestriel | 6 nos
- ☐ **Futuribles** | Bimestriel | 3 nos
- ☐ **La Revue des Deux Mondes** | Mensuel | 6 nos
- ☐ **Études** | Mensuel | 6 nos

HISTOIRE ET GÉOGRAPHIE

- ☐ **L'Histoire** | Mensuel | 10 nos + 1 n° double
- ☐ **Histoire & Civilisations** | Mensuel | 11 nos
- ☐ **Population & Avenir** | Bimestriel | 7 nos
- ☐ **La Revue Urbanisme** | Trimestriel | 6 nos

ART ET PASSION

- ☐ **Beaux Arts magazine** | Mensuel | 10 nos
- ☐ **Connaissance des arts** | Mensuel | 8 nos
- ☐ **Ideat** | Bimestriel | 10 nos
- ☐ **Polka** | Trimestriel | 6 nos
- ☐ **Les Inrockuptibles** | Hebdomadaire | 26 nos
- ☐ **Télérama** | Hebdomadaire | 21 nos
- ☐ **So Foot** | Mensuel | 10 nos

2. TOTAL DE MA COMMANDE

Merci de vérifier si vous avez coché la ou les revues souhaitée(s).

☐ 1 abonnement → **39 €** ☐ 3 abonnements → **99 €**
☐ 2 abonnements → **69 €** ☐ autre (30 € par abonnement supplémentaire),
soit _____ abonnements → Total _____ €

3. MES COORDONNÉES - Merci d'écrire en majuscule.

☐ M ☐ Mme Nom _____
Prénom _____
Adresse (France métropolitaine seulement) _____
_____
Code Postal |_|_|_|_|_| Ville _____
Email _____

J'accepte de recevoir par email des offres de Rue des Etudiants ☐ oui ☐ non
J'accepte de recevoir par email des offres des partenaires de Rue des Etudiants ☐ oui ☐ non

4. JE RÈGLE LA SOMME DE

☐ 39€ ☐ 69€ ☐ 99€ ☐ autre montant _____ €
par : ☐ Chèque à l'ordre de Rue des Etudiants
☐ CB ☐ Visa ☐ Mastercard
N° |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_|
Date d'expiration |_|_| |_|_|
Cryptogramme (Les 3 chiffres au dos de votre carte) |_|_|_|

Date et signature obligatoires :

En retournant ce formulaire, vous acceptez que Rue des Etudiants, responsable de traitement, utilise vos données pour les besoins de votre commande, de la relation Client et d'actions commerciales. Pour connaître les modalités de traitement de vos données et d'exercice de vos droits (accès, rectification, effacement, opposition, portabilité, limitation des traitements, sort des données après décès), consultez notre politique de confidentialité à l'adresse http://www.ruedesetudiants.com/ ou écrivez à notre DPO – 67/69 avenue Pierre-Mendès France - 75013 Paris ou dpo@groupelemonde.fr.

Je certifie être étudiant(e) ☐ Année d'étude _____
Filière _____

PASCA2

Offre valable jusqu'au 30 juin 2021.

Abonnez-vous encore plus vite sur ruedesetudiants.com

PERRINE LAFFONT

CHAMPIONNE OLYMPIQUE DE SKI DE BOSSES, 3 FOIS VICTORIEUSE DE LA COUPE DU MONDE

MGEN, Mutuelle Générale de l'Éducation Nationale, immatriculée sous le numéro SIREN 775 685 399, MGEN Vie, immatriculée sous le numéro SIREN 441 922 002, MGEN Filia, immatriculée sous le numéro SIREN 440 363 588, mutuelles soumises aux dispositions du livre II du Code de la mutualité. MGEN Action sanitaire et sociale, immatriculée sous le numéro SIREN 441 921 913, MGEN Centres de santé, immatriculée sous le numéro SIREN 477 901 714, mutuelles soumises aux dispositions du livre III du Code de la mutualité. Siège social : 3 square Max-Hymans -75748 Paris CEDEX 15.